

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ  
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Северо-Кавказский филиал  
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский технический университет связи и информатики»

**А.Г. ЖУКОВСКИЙ**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы №1  
по дисциплине

**ЛИНИИ РАДИОСВЯЗИ И МЕТОДЫ ИХ ЗАЩИТЫ**

Направление подготовки 11.03.02  
Инфокоммуникационные технологии и системы связи  
профиль Защищенные инфокоммуникационные системы

Ростов-на-Дону  
2022

**УДК 621.396.677**

**Жуковский А.Г.** Исследование характеристик и параметров антенн, применяемых в системах радиосвязи. *Методическое пособие по выполнению лабораторной работы.* Ростов-на-Дону, СКФ МТУСИ: 2022. – 38 с.

Методическое пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплину «ЛИНИИ РАДИОСВЯЗИ И МЕТОДЫ ИХ ЗАЩИТЫ». Помимо сведений о программе работы, в пособии приводятся краткие теоретические сведения о характеристиках и параметрах антенн, применяемых в мобильной связи, а также об особенностях их конструкций. Описываются правила работы с компьютерной программой по исследованию антенн MMANA, порядок проведения исследований, требования к оформлению отчета, контрольные вопросы.

Рассмотрено и одобрено  
на заседании кафедры «ИТСС»  
Протокол №5 от 19.12.2022

© СКФ МТУСИ, Жуковский А.Г., 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы	4
Содержание работы	4
Краткие теоретические сведения о характеристиках и параметрах антенн и особенностях их конструкций	4
1. Основные характеристики и параметры передающих антенн	4
1.1. Общие принципы построения антенн	4
1.2 Параметры антенны как нагрузки передатчика	10
1.3. Векторная комплексная диаграмма направленности антенны	13
1.4. Вторичные параметры, характеризующие направленность антенн	17
1.5. Принцип взаимности и параметры приемных антенн	19
2. Программа подготовки к работе	22
3. Описание порядка работы с программой MMANA	22
4. Порядок проведения исследований	30
5. Содержание отчета	36
6. Контрольные вопросы	36
Литература	38

## **Цель работы**

Приобретение навыков практического использования специализированных программ по исследованию антенн при их моделировании для применения в устройствах сотовой мобильной связи. Расширение навыков использования компьютеров при проведении расчетов характеристик и параметров антенн.

## **Содержание работы**

1. Исследование штыревой антенны.
2. Исследование полуволнового вибратора.
3. Исследование рамочной антенны.
3. Исследование антенны типа «волновой канал» (директорной антенны).

## **КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ И ПАРАМЕТРАХ АНТЕНН И ОСОБЕННОСТЯХ ИХ КОНСТРУКЦИЙ**

### **1. Основные характеристики и параметры передающих антенн**

#### **1.1. Общие принципы построения антенн.**

Антенна является необходимым элементом любого радиопередающего и радиоприемного устройства. Антенна радиопередатчика (передающая антенна) предназначена для преобразования тока высокой частоты в энергию излучаемых ею электромагнитных волн. Антенна радиоприемника (приемная антенна) предназначена для преобразования принятых ею электромагнитных волн в энергию тока высокой частоты. Характер процессов, происходящих в передающей и приемной антеннах, определяет обратимость их использования. Обратимость антенн находит выражение не только в принципиальной возможности использования одной и той же антенны в качестве передающей или приемной, но и в том, что основные параметры антенны сохраняются при использовании ее как для передачи, так и для приема. Это имеет большое

практическое значение. Так, многие передвижные радиостанции, предназначенные для связи, имеют общую антенну для передачи и для приема.

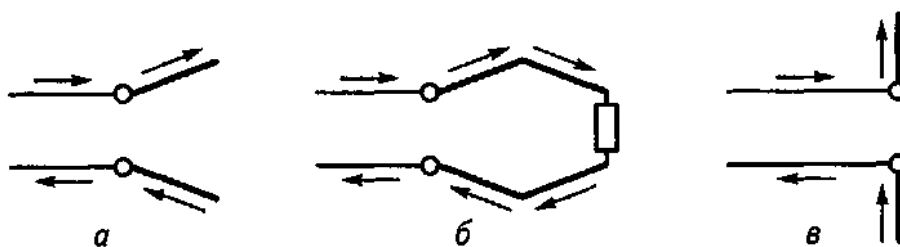


Рисунок 1 – Симметричные антенны

Электрическая цепь и вспомогательные устройства, с помощью которых энергия радиочастотного канала подводится от радиопередатчика к антенне или от антенны к радиоприемнику, называется *фидером*. Конструкция фидера зависит от диапазона передаваемых по нему частот. При передаче электромагнитной энергии по линии стремятся уменьшить излучение самой линии.

Для этого провода линии располагают параллельно и по возможности ближе друг к другу. При этом поля двух одинаковых по значению, но противоположно направленных токов взаимно компенсируются и излучения энергии в окружающее пространство не происходит. При создании антенны ставится противоположная задача: получение возможно большего излучения. Для этого можно использовать те же длинные линии, устранив одну из причин, лишаящих фидер излучающих свойств. Можно, например, раздвинуть провода линии на некоторый угол, в результате чего их поля не будут компенсировать друг друга. На этом основана работа V-образных и ромбических антенн, излучающие провода которых расположены под острым углом один к другому (рис. 1, а, б), и симметричного вибратора, получающегося при разведении проводов на  $180^\circ$  (см. рис. 1, в).

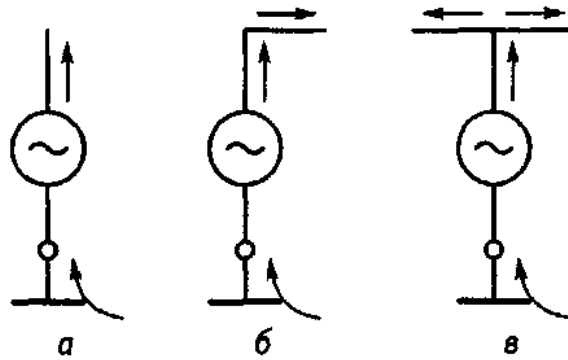


Рисунок 2 – Несимметричные антенны

Компенсирующее действие одного из проводов фидера можно устранить, исключив его из системы. Это приводит к получению несимметричного вибратора (рис. 2, а). Все антенны, использующие этот принцип работы, относятся к классу несимметричных антенн. К ним также принадлежат Г-образные и Т-образные антенны (см. рис. 2, б, в).

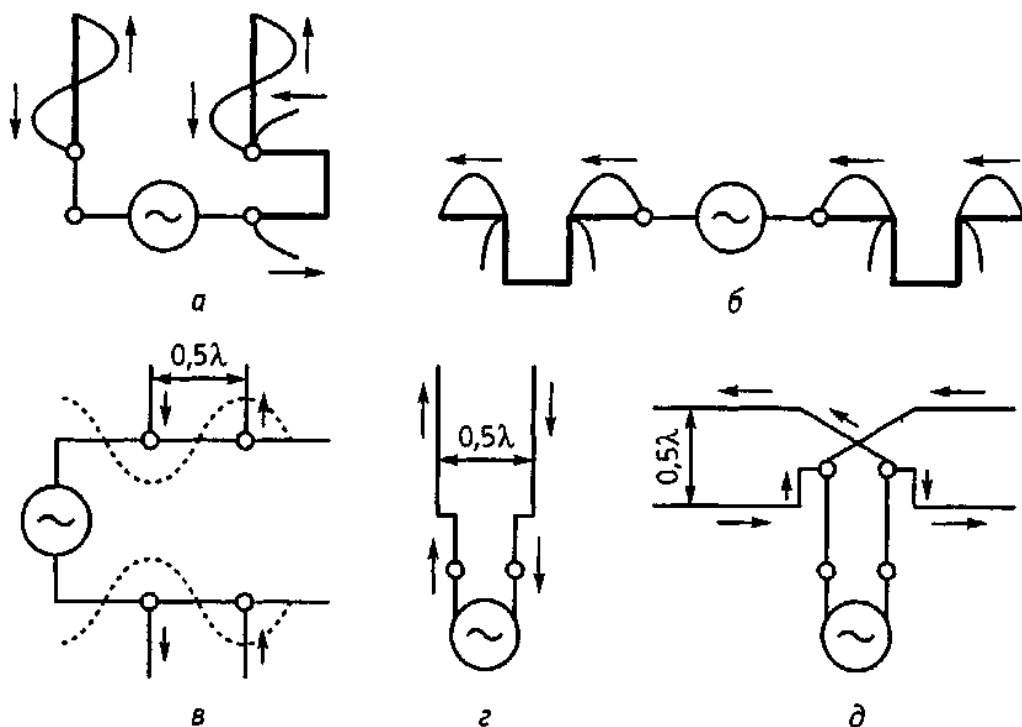


Рисунок 3 – Синфазные (а, б) и противофазные (в, г) антенны

Фидер излучает, если соседние участки его двух проводов обтекаются токами, совпадающими по фазе, поля которых усиливают друг друга. Для этого

необходимо создать фазовый сдвиг в половину длины волны, например за счет неизлучающего шлейфа (рис. 3, а). На таком же принципе основаны синфазные антенны, получившие широкое распространение (см. рис. 3, б).

Фидер будет излучать, если расстояния между проводами по некоторым направлениям приобретают значительную разность хода. Более того, можно так подобрать расстояние между проводами, что по некоторым направлениям произойдет сложение волн от обоих проводов. Это широко используется в многочисленных противофазных антеннах. Работу таких антенн нетрудно понять из трех примеров, приведенных на рис. 3 в-д. В антенне (см. рис. 3, в) противофазность токов в проводах обеспечивается подключением их к фидеру на расстоянии в полволны. Антенна, изображенная на рис. 3, з, представляет собой фидер, как бы расширенный на конце. В антенне на рис. 3, д противофазность токов обеспечивается перекрещиванием питающих проводов.

Остановимся на работе симметричного вибратора как излучателя, который входит в состав многих антенн. Симметричный вибратор можно представить как длинную линию, разомкнутую на конце, провода которой развернуты на  $180^\circ$ . Каждый элемент данной линии обладает определенной индуктивностью и емкостью между проводами (рис. 4).

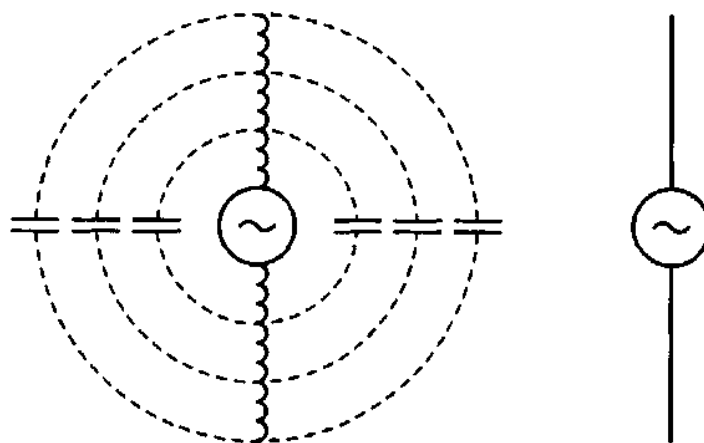


Рисунок 4 – Симметричный вибратор и его эквивалентная схема

Рассмотрим процесс свободных электрических колебаний в симметричном вибраторе. Присоединим обе его половины к зажимам источника постоянной ЭДС (рис. 5, а). После того как распределенные емкости проводов вибратора зарядятся и между его половинами возникнет разность потенциалов, отключим источник питания и замкнем обе половины вибратора перемычкой (см. рис.5, б). При этом распределенные емкости начнут разряжаться через перемычку. Очевидно, что через отрезки провода вибратора, расположенные у середины, протекает наибольший электрический заряд, и поэтому разрядный ток имеет наибольшее значение; к концам же провода ток уменьшается до нуля. Ток в проводе нарастает постепенно, поскольку в распределенных индуктивностях возникает ЭДС самоиндукции. Разность потенциалов между точками, равноудаленными от середины вибратора, тем больше, чем дальше эти точки от середины, так как тем большая часть распределенной индуктивности провода участвует в его создании (см. рис. 5, б). Знак потенциала относительно средней точки по обе стороны от нее различен, так как в одной половине вибратора ток течет к ней, а в другой - от нее.

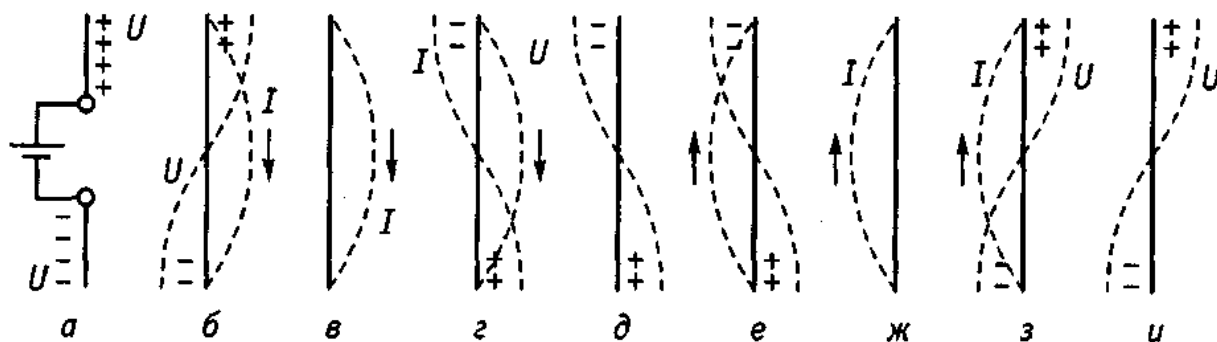


Рисунок 5 – Свободные колебания в симметричном вибраторе

По мере разряда распределенной емкости ток в проводе нарастает и достигает максимума, когда она полностью разрядится. При этом вся энергия электрического поля, запасенная емкостью, переходит в энергию магнитного поля распределенных индуктивностей (см. рис.5, в). Если вначале



индуктивность проводов вибратора препятствовала нарастанию тока, то теперь она препятствует его уменьшению. Поэтому ток уменьшается постепенно, сохраняя прежнее направление (см. рис. 5, г). За счет этого происходит перезаряд распределенной емкости, и когда ток спадает до нуля, емкости оказываются перезаряженными (см. рис. 5, д). После этого процесс протекает в обратном направлении (см. рис. 5, е-и). Таким образом в вибраторе возникают свободные электрические колебания. При этом в нем устанавливаются стоячие волны тока и напряжения и вдоль его длины укладывается половина стоячей волны тока и напряжения. Следовательно, длина волны  $\lambda$ , собственных колебаний симметричного вибратора вдвое больше его длины, т.е.  $\lambda = 2l$ . Поэтому симметричный вибратор называют также *полуволновым диполем*, чем подчеркивается, что он вдвое короче длины волны собственных колебаний.

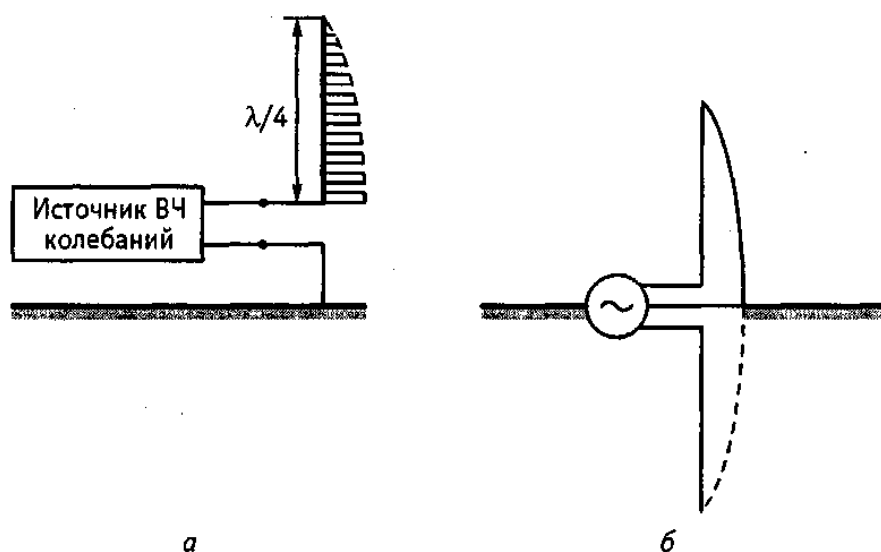


Рисунок 6 – Четвертьволновый вибратор

Если полуволновый вибратор расположить вертикально, его размер можно уменьшить вдвое благодаря проводящим свойствам земли. При вертикальном расположении нижний конец антенны подключается к одному из зажимов генератора электромагнитных колебаний (рис. 6, а), второй зажим генератора при этом заземляется. Если предположить, что земля является идеальным проводником, то в ней наводится ЭДС, которая действует как

зеркальное изображение основного вибратора (см. рис.6, б). Такая антенна называется вертикальной несимметричной антенной, ее высота приблизительно равна  $\lambda/4$ . Все сказанное справедливо только в том случае, когда земля представляет собой идеальный проводник. Когда же земля обладает плохими проводящими свойствами, характер распределения тока в земной поверхности изменяется. Особенно большое значение имеет сопротивление земли вблизи основания антенны. Для улучшения проводимости этого участка применяют металлизацию земли: закапывают в землю металлические листы, провода; улучшают химический состав почвы, пропитывая ее различными солями.

Опыт показывает, что нет надобности осуществлять полную металлизацию земли, достаточно хорошо работает система радиальных расходящихся проводов, закопанных в землю на глубину 20...50 см. Качество металлизации улучшается, если радиальные провода соединяются между собой перемычками.

Часто заземление заменяют системой проводов, не зарытых, а поднятых над землей, называемых *противовесом*. Последний должен достаточно хорошо экранировать антенный провод от земли, играя роль хорошо проводящей поверхности. Он обычно дает худшие результаты, но на передвижных радиостанциях является единственным выходом из положения. Обычно в качестве противовеса используется корпус автомобиля, на котором расположена радиостанция. Таким же образом поступают при необходимости установки радиостанции на каменистом грунте.

## 1.2 Параметры антенны как нагрузки передатчика.

Эквивалентная схема антенны как нагрузки генератора представлена на рис.7. Точки "а", "в" обозначают входные зажимы антенны (точки ее питания).

Если обозначить комплексные амплитуды напряжения и тока на входе антенны  $\dot{U}_A$  и  $\dot{I}_A$  соответственно, то *входное сопротивление* антенны определяется выражением

$$\dot{Z}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A}. \quad (1)$$

В общем случае входное сопротивление - комплексная величина. Найдем его компоненты. Для этого умножим числитель и знаменатель (1) на комплексно-сопряженное значение тока на входе антенны ( $\dot{I}_A^*$ ). Тогда получим

$$\dot{Z}_A = \frac{\dot{P}_A}{\dot{I}_A^2}. \quad (2)$$

Здесь учтено, что мощность  $\dot{P}_A$ , подводимая к антенне, определяется выражением

$$\dot{P}_A = 0,5 \cdot \dot{U}_A \cdot \dot{I}_A^*. \quad (3)$$

Через  $\dot{I}_A^2$  обозначен квадрат действующего значения тока на входе антенны, причем

$$\dot{I}_A^2 = 0,5 \cdot \dot{I}_A \cdot \dot{I}_A^*. \quad (4)$$

Так как подводимая мощность  $\dot{P}_A$  складывается из активных мощностей излучения  $P_\Sigma$  и потерь  $P_\Pi$  и мощности реактивных полей антенны  $P_X$ , то

$$\dot{Z}_A = \frac{P_\Sigma}{\dot{I}_A^2} + \frac{P_\Pi}{\dot{I}_A^2} + \frac{iP_X}{\dot{I}_A^2} = R_\Sigma + R_\Pi + iX_A = R_A + iX_A. \quad (5)$$

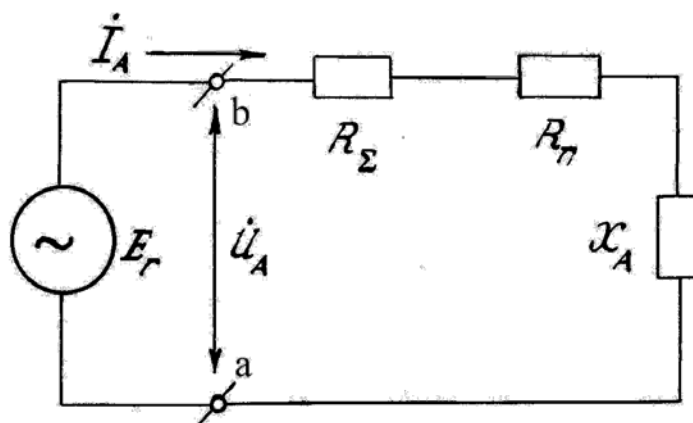


Рисунок 7. Эквивалентная схема антенны  
как нагрузки генератора

Активная часть входного сопротивления ( $R_A$ ) состоит из двух слагаемых: полезной (*сопротивление излучения  $R_\Sigma$* ) и вредной (*сопротивление потерь  $R_\Pi$* ).

Реактивная часть входного сопротивления  $X_A$  соответствует мощности реактивных полей вокруг антенны. Её стараются минимизировать. При резонансе  $X_A = 0$  и входное сопротивление антенны чисто активное.

Потери электромагнитной энергии в передающей антенне определяются ее превращением в тепло в металлических конструкциях и диэлектрике антенны.

Эффективность работы антенны как преобразователя энергии оценивается с помощью *коэффициента полезного действия* (кпд), впервые введенного в теорию антенн отечественным ученым профессором И.Г.Кляцкиным в 1921 г. Кпд антенны равен отношению излученной антенной мощности к активной мощности, потребляемой антенной,

$$\eta = \frac{R_\Sigma}{P_A} = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma + R_\Pi} = \frac{R_\Sigma}{R_\Sigma + R_\Pi}. \quad (6)$$

Так как реальные радиолинии функционируют в пределах некоторой полосы частот, интерес представляют частотные характеристики кпд, сопротивления излучения, сопротивления потерь и реактивного сопротивления.

Для характеристики антенны как нагрузки передатчика важную роль играет *электрическая прочность*, под которой понимают то максимальное напряжение (или максимальную мощность), которое может быть подведено к антенне при сохранении нормальных условий ее функционирования (отсутствие пробоя и неискаженная передача сигналов).

*Входное сопротивление, кпд и электрическая прочность* антенны в заданной полосе частот являются *параметрами*, определяющими функцию антенны как *преобразователя направляемых волн в свободные*.

### 1.3. Векторная комплексная диаграмма направленности антенны

Поле излучения антенны является *вектором*, который характеризуется амплитудой, фазой и ориентацией в пространстве. В связи с этим различают *амплитудную, фазовую и поляризационную* диаграммы направленности.

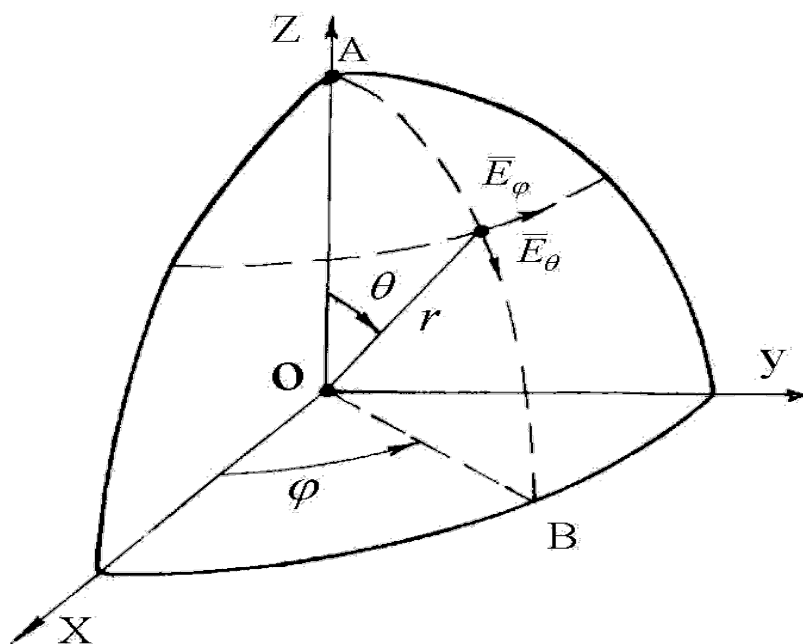


Рисунок 8. Сферическая система координат

Наглядное представление о распределении энергии волн в пространстве даёт *амплитудная характеристика (диаграмма) направленности*, определяемая зависимостью амплитуды напряженности создаваемого антенной поля от направления в пространстве при фиксированном расстоянии. Направление определяется азимутальным ( $\varphi$ ) и меридиональным ( $\theta$ ) углами сферической системы координат (рис. 8). При этом поле измеряется (или рассчитывается) на одном и том же (достаточно большом) расстоянии  $r$  от антенны.

Амплитудную диаграмму направленности часто называют просто *диаграммой направленности*. *Пространственная (объемная) диаграмма направленности* изображается в виде поверхности  $f(\theta, \varphi)$ . На рис.9 представлены примеры пространственных диаграмм направленности:

тороидальной (а), игольчатой, или карандашной (б), веерной (в), косекансной (г).

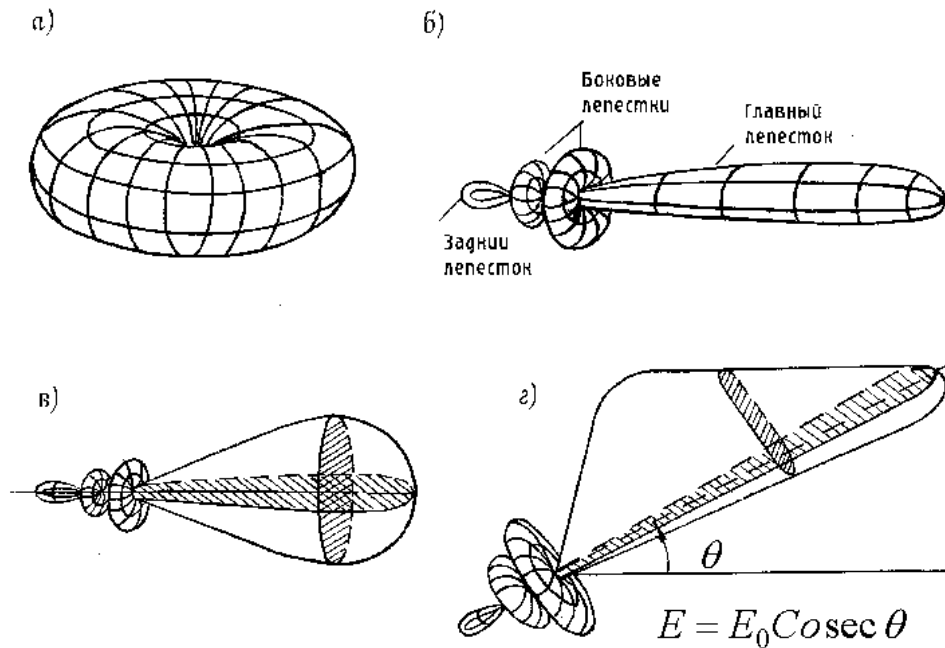


Рисунок 9. Пространственные диаграммы направленности: тороидальная (а), игольчатая (б), веерная (в), косекансная

Тороидальную диаграмму направленности имеет элементарный электрический вибратор (диполь), ориентированный вдоль оси  $z$ . Игольчатая диаграмма направленности используется, например, в системах связи через ИСЗ. Веерные и косекансные диаграммы используются в некоторых типах радиолокаторов. Косекансная диаграмма направленности обеспечивает одинаковую засветку на экране индикатора кругового обзора РЛС самолетов, находящихся на различных дальностях.

Пространственная диаграмма направленности, у которой максимальное значение равно единице, называется *нормированной* и обозначается как  $F(\theta, \varphi)$ . Она легко получается из ненормированной путем деления всех ее значений на максимальное

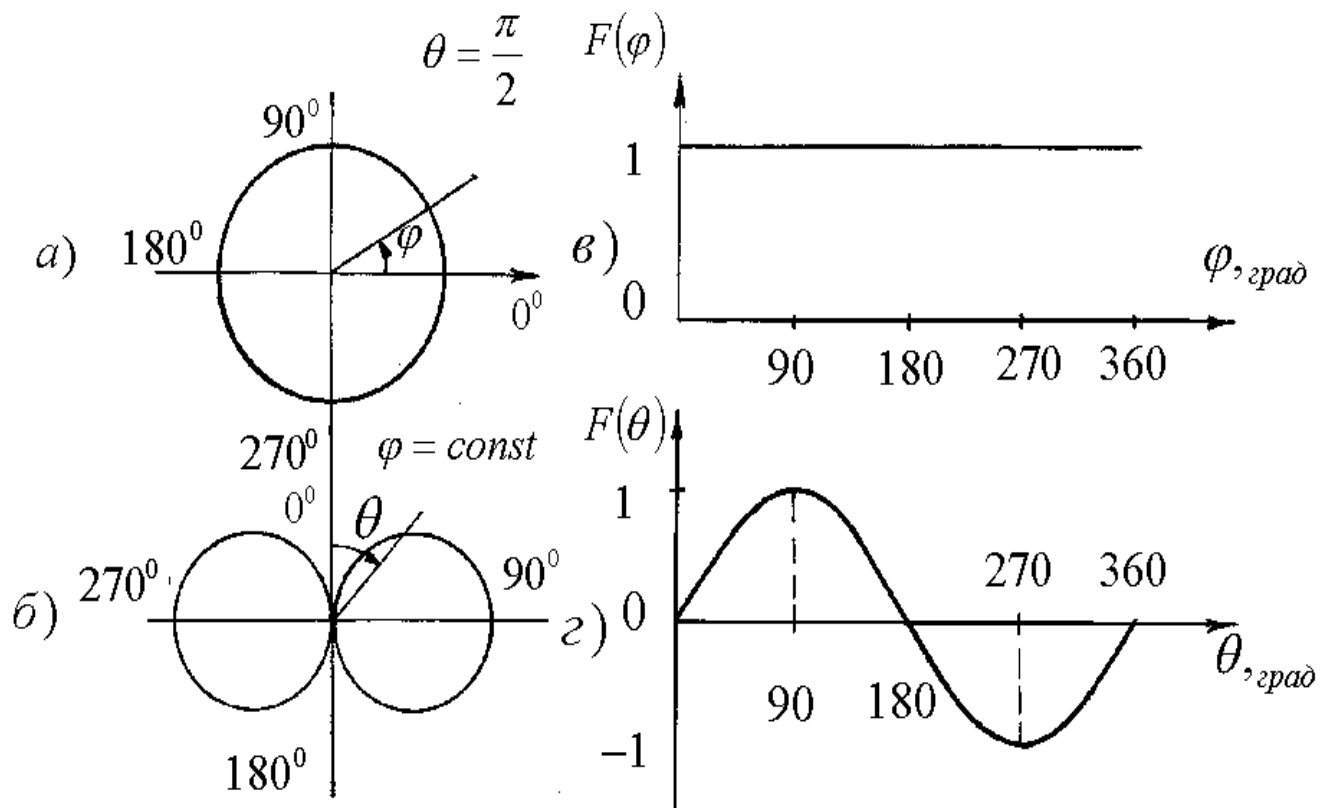


Рисунок 10. Диаграммы направленности элементарного вибратора  $F(\varphi)$  (а, в) и  $F(\theta)$  (б, г) в полярной (а, б) и декартовой (в, г) системах координат.

$$F(\theta, \varphi) = \frac{f(\theta, \varphi)}{f_{\max}(\theta, \varphi)}. \quad (7)$$

Очевидно, построение пространственных диаграмм направленности неудобно. Поэтому на практике обычно строят *диаграммы направленности в какой-либо одной плоскости*, в которой они изображаются плоской кривой  $F(\varphi)$  или  $F(\theta)$  в полярных или декартовых системах координат.

На рис. 10 для примера представлены диаграммы направленности  $F(\varphi)$  и  $F(\theta)$  элементарного вибратора, имеющего объемную диаграмму тороидальной формы. На рис. 10,а,б эти диаграммы изображены в полярной системе координат, а на рис.10,в,г –в декартовой.

Помимо рассмотренных выше диаграмм направленности (ДН) по напряженности поля (амплитудных диаграмм направленности)  $F(\theta, \varphi)$ , иногда используют *диаграммы направленности антенны по мощности*  $\Phi(\theta, \varphi)$ , которые определяют зависимость плотности потока мощности излучаемого

антенной поля от направления в пространстве при фиксированном расстоянии. Выразим плотность потока мощности  $\Pi$  в дальней зоне антенны через напряженность поля

$$\Pi = \frac{1}{2} \dot{E} \cdot \dot{H}^* = \frac{1}{240\pi} |E|^2. \quad (8)$$

Поскольку она пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля, то

$$\Phi(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi). \quad (9)$$

В тех случаях, когда необходимо получить изображение боковых лепестков низкого уровня, целесообразно использовать *логарифмический масштаб*

$$F_{дБ}(\theta, \varphi) = 10 \cdot \lg \Phi(\theta, \varphi) = 20 \cdot \lg F(\theta, \varphi). \quad (10)$$

В этом случае по оси ординат откладываются значения диаграммы направленности в децибелах.

Каждая остронаправленная диаграмма направленности (рис.9,б,в,г) содержит главный лепесток, боковые лепестки, задний лепесток и имеет определённую ширину главного лепестка и некоторый уровень боковых лепестков, которые относятся к вторичным параметрам, характеризующим направленные антенны.

Ширина главного лепестка диаграммы направленности (чаще ее называют *шириной луча*) определяется как угол между направлениями, в которых плотность потока мощности уменьшается в 2 раза ( $2\theta_{0,5}$ ) в 10 раз ( $2\theta_{0,1}$ ) или до нуля ( $2\theta_0$ ). Эта ширина для диаграммы направленности по напряженности будет соответствовать уровням 0,707; 0,316 и 0 соответственно.

*Уровень боковых лепестков* определяется отношением величины наибольшего и главного лепестков. Он может выражаться в размах, процентах и децибелах. Иногда задаются требования на уровень боковых лепестков в некотором секторе углов либо даже на уровень задних лепестков.



Антенны, которые должны быть ненаправленными, характеризуют *коэффициентом равномерности диаграммы направленности*, под которым подразумевают отношение минимального значения напряженности поля к максимальному.

Диаграммы направленности антенны по полю или мощности не дают исчерпывающей информации о ее направленных свойствах. В ряде случаев, например, в фазовых системах, необходимо знание *фазовой диаграммы направленности* антенны, под которой понимают зависимость фазы поля излучения от направления при постоянном расстоянии от антенны и выбранном начале координат:

$$\psi = \psi(\theta, \varphi) \quad \text{при} \quad r = r_0 = \text{const} \quad (11)$$

На рис. 3.10,а условно показана в полярной системе координат фазовая диаграмма направленности антенны. В пределах главного лепестка фаза равна нулю. При переходе к соседнему лепестку фаза изменяется на  $180^\circ$ . Разумеется, фазовую диаграмму можно изображать и в декартовой системе координат.

*Поляризационной диаграммой* антенны называется зависимость коэффициента эллиптичности от направления в пространстве  $K_\varphi(\theta, \varphi)$ . Эта характеристика чрезвычайно важна для антенн УКВ, осуществляющих связь с ИСЗ или через ИСЗ.

Амплитудная, фазовая и поляризационная диаграммы направленности антенны являются характеристиками ее направленных свойств.

#### 1.4. Вторичные параметры, характеризующие направленность антенн

Помимо ширины луча и уровня боковых лепестков, к вторичным параметрам, характеризующим направленные свойства антенны, относят *коэффициент направленного действия* (КНД). Этот параметр ввел в 1929 г.

патриарх отечественной антенной науки член-корреспондент Академии наук СССР А.А.Пистолькорс.

КНД - это число, показывающее, во сколько раз пришлось бы увеличить мощность излучения антенны при переходе от направленной антенны ( $P_{\Sigma}$ ) к ненаправленной ( $P_{\Sigma 0}$ ) при условии сохранения одинаковой напряженности поля в месте приема:

$$D = \frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma}} \quad (12)$$

Эквивалентным первому является второе определение: КНД - это число, показывающее, во сколько раз можно уменьшить мощность излучения направленной антенны по сравнению с ненаправленной для обеспечения в точке наблюдения неизменной плотности потока мощности.

Для оценки выигрыша в мощности за счет направленных свойств антенны с учетом потерь в ней вводится параметр, называемый *коэффициентом усиления* (КУ) антенны. Коэффициентом усиления  $G$  антенны называется отношение мощности  $P_{\Sigma 0}$ , излучаемой ненаправленной антенной без потерь, к мощности  $P_A$ , подводимой к направленной антенне с потерями при условии получения одинаковой напряженности поля в точке наблюдения, т.е.

$$G = \frac{P_{\Sigma 0}}{P_A} \quad (13)$$

Умножим и разделим правую часть (13) на  $P_{\Sigma}$  (мощность, излученную направленной антенной). Тогда получим

$$G = \frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma}} \cdot \frac{P_{\Sigma}}{P_A} = D \cdot \eta \quad (14)$$

Таким образом, коэффициент усиления антенны равен произведению КНД и КПД.

### 1.5. Принцип взаимности и параметры приемных антенн

Известный из курса электродинамики принцип (или теорема) взаимности позволяет утверждать применительно к антеннам с линейными цепями (параметры которых не зависят от амплитуд токов и напряжений) следующее. Если при приложении к одной из антенн ЭДС  $\varepsilon_A$  во второй протекает ток  $J$ , то при приложении ЭДС  $\varepsilon_A$  ко второй антенне в первой также будет протекать ток  $J$ .

С помощью принципа взаимности можно доказать, что параметры антенн в режиме приёма сохраняются теми же, что и в режиме передачи, хотя некоторые параметры и меняют свой смысл.

Поскольку приёмная антенна выступает по отношению к приёмнику как генератор, её *внутреннее сопротивление* равняется входному сопротивлению той же антенны, используемой как передающая.

*Амплитудная (фазовая) диаграмма направленности* приемной антенны определяет зависимость амплитуды (фазы) ЭДС на ее входных зажимах от направления прихода плоской электромагнитной волны при постоянных амплитуде и фазе напряженности поля в месте приема.

*Поляризационная диаграмма направленности* приёмной антенны соответствует аналогичной характеристике антенны в режиме передачи; из нее видно, какова должна быть поляризация поля в точке приема для получения максимального полезного эффекта.

Под *КНД* приемной антенны понимают отношение мощности, принятой направленной антенной, к мощности, принятой ненаправленной антенной, при одной и той же напряженности поля в месте приема.

*КПД* приемной антенны характеризует отношение полезной мощности, отданной приёмнику, к полной мощности, принятой антенной.

*Коэффициент усиления* приемной антенны определяется отношением мощности, отдаваемой направленной антенной приёмнику, к мощности,

принимаемой ненаправленной антенной без потерь, при одинаковой напряженности поля в месте приема.

Таким образом, передающие и приемные антенны в принципе обратимы, если, конечно, не содержат невзаимных узлов (например, усилителей радиочастоты и т.п.) и если позволяет их электрическая прочность.

Для характеристики приемных антенн вводят и специфические параметры. К ним относятся действующая длина антенны, действующая площадь антенны, коэффициент использования площади раскрыва, коэффициент эффективности, шумовая температура, шумовая добротность и коэффициент шума *Действующей (эффективной) длиной* приёмной антенны  $I_d$  называется отношение максимального напряжения  $U$ , которое может быть наведено на клеммах приемной антенны без потерь, к напряжённости поля  $E$  в месте её расположения:

$$I_d = \frac{U}{E} \quad (15)$$

*Действующей (эффективной) площадью* приемной антенны  $S_{эф}$  называется отношение максимальной мощности  $P$ , которая может быть отдана приемной антенной (без потерь) в согласованную нагрузку, к плотности потока мощности  $\Pi$  в падающей волне:

$$S_{эф} = \frac{P}{\Pi} \quad (16)$$

Если обозначить через  $S$  геометрическую площадь раскрыва, то

$$S_{эф} = \nu \cdot S, \quad (17)$$

где  $\nu$  - *коэффициент использования площади* (КИП) раскрыва.

Между КНД и  $S_{эф}$  существует простая связь

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{эф} \quad (18)$$

или

$$S_{эф} = \frac{D\lambda^2}{4\pi} \quad (19)$$

Коэффициентом эффективности антенны, или ее энергетической эффективностью  $g_A$ , принято называть произведение КПД и КИП:

$$g_A = \eta \cdot \nu. \quad (20)$$

Между действующей длиной, сопротивлением излучения и КНД антенны существует простая связь ( $k = 2\pi / \lambda$ ):

$$D = 30 \cdot k^2 \cdot I_D^2 / R_\Sigma \quad (21)$$

Это соотношение несложно получить, если учесть, что излучённая антенной мощность может быть найдена, с одной стороны, путём интегрирования вектора Пойнтинга, а с другой, - через сопротивление излучения и квадрат эффективного значения тока:

$$P_\Sigma = \int \frac{E^2 \cdot dS}{120 \cdot \pi} = I_A^2 \cdot R_\Sigma \quad (22)$$

Выражение (21) вытекает из (22), если учесть (11) и соотношение

$$E = 30 \cdot k \cdot I_D \cdot I_A \cdot F(\theta, \varphi) / r, \quad (23)$$

аналогичное выражению для амплитуды напряжённости электрического поля диполя Герца в дальней зоне.

## **2. Программа подготовки к работе**

1. Изучить теоретические положения, касающиеся конструктивных особенностей и технических характеристик антенн.
2. Уяснить цель и порядок проведения лабораторной работы.
3. Ознакомиться с особенностями работы с компьютерной программой MMANA.
4. Подготовить бланк отчета по работе.
5. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

## **3. Описание порядка работы с программой MMANA**

Программа моделирования антенн, расчета их характеристик и параметров антенн реализована в бесплатном программном продукте MMANA, разработанной японским радиоинженером Makoto Mori.

Программа позволяет:

- Создавать и редактировать описания антенны
- Рассматривать множество разных видов антенн.
- Рассчитывать диаграммы направленности (ДН) антенн
- Редактировать описание каждого элемента антенны.
- Оптимизировать антенну, гибко настраивая цели оптимизации: Zвх, КСВ, усиление
- Сохранять все шаги оптимизации в виде отдельной таблицы. Это полезно для последующего просмотра и анализа
- Строить графики: Zвх, КСВ, усиления, включая показ зависимости ДН от частоты.

При старте программы открывается закладка **Геометрия** и вы видите несколько полей вверху и три таблицы (рис. 11), на которой открыт файл уже имеющейся антенны

**Имя** 4ele Delta Loop 6m **F** 50200 MHz ☐ В лямбдах

**Wire 12** Автосегментация: **DM1** 400 **DM2** 40 **SC** 2.0 **EC** 1 ☐ Не разрывать

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	1.103	0.639	0.0	-1.103	0.639	7.0	-1
2	0.0	-1.103	0.639	0.0	0.0	-1.267	0.8	-1
3	0.0	0.0	-1.267	0.0	1.103	0.639	0.8	-1
4	-1.46	1.14	0.657	-1.46	-1.141	0.657	7.0	-1
5	-1.46	-1.141	0.657	-1.46	0.0	-1.314	0.8	-1
6	-1.46	0.0	-1.314	-1.46	1.141	0.657	0.8	-1
7	1.35	1.087	0.629	1.35	-1.087	0.629	7.0	-1
8	1.35	-1.087	0.629	1.35	0.0	-1.247	0.8	-1
9	1.35	0.0	-1.247	1.35	1.087	0.629	0.8	-1
10	2.81	1.08	0.625	2.81	-1.081	0.625	7.0	-1

**Source 1** ☒ Одинаковые источники **Load 0** ☒ Включить нагрузку(и)

No.	PULSE	Фаза(гр)	Напр(V)
1	w3b	0.0	1.0
След			

No.	PULSE	Тип	L(μH)	C(pF)	Q	f(MHz)
След						

Рисунок 11. Окно закладки **Геометрия**

Поле **Имя** – это название антенны

Поле **F...MHz** – основная частота антенны. Можно вводить ее значение вручную.

Первая таблица **Провода** – это описание проводов. В алгоритме расчета любая антенна представляется как набор проводов. Каждая строка в этой таблице – описание одного провода: X1, Y1, Z1 – это координаты в трехмерном пространстве начала провода, а X2, Y2, Z2 – то же самое, но конца провода. R – радиус провода.

*Примечание: не изменять установленные по умолчанию значения DM1, M2, EC и SC, а параметр Seg всегда ставьте равным -1 для оптимальной*

автосегментации. Также не изменять параметры двух нижних таблиц - источники и нагрузка.

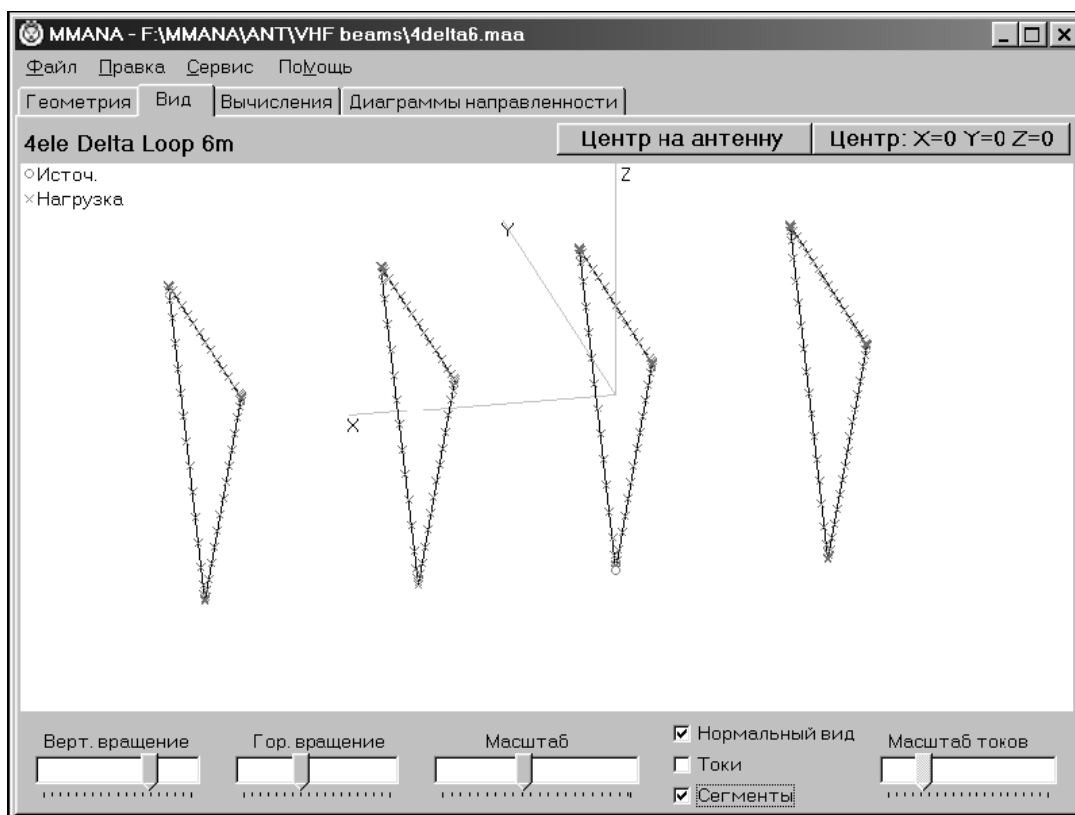


Рисунок 12. Окно закладки **Вид**

Выбрав закладку **Вид** можно посмотреть внешний вид в трехмерном пространстве описанной антенны (или взятой из готового файла) и распределение сегментов и токов по ней. На рис. 12 показано окно этой закладки. Движками **Верт. вращение**, **Гор. вращение** и **Масштаб** можно рассмотреть антенну со всех сторон.

В закладке **Вычисления** производятся установки условий расчета, выводится ход расчета и окончательные результаты. В окне **Частота** устанавливается частота анализа антенны (по умолчанию берется частота, установленная в закладке **Геометрия**). В этом поле имеется удобный для



выбора список частот, а если необходима специфическая частота, то ее значение вводится вручную. Вид этого окна показан на рис. 13.

Правое окно – информационное. Оно отображает текущее состояние расчета. Туда же выводятся сообщения о возможных ошибках расчета. В окошке **Земля** выбирается тип земли. Высота антенны над землей устанавливается в поле **Высота** (этого можно не делать, если в окошке **Земля** выбрана опция **Свободное пространство**). Программа поднимает антенну вверх по оси Z. В поле **Материал** из списка выбирается материал антенны. Тип материала оказывает заметное влияние на параметры антенны.

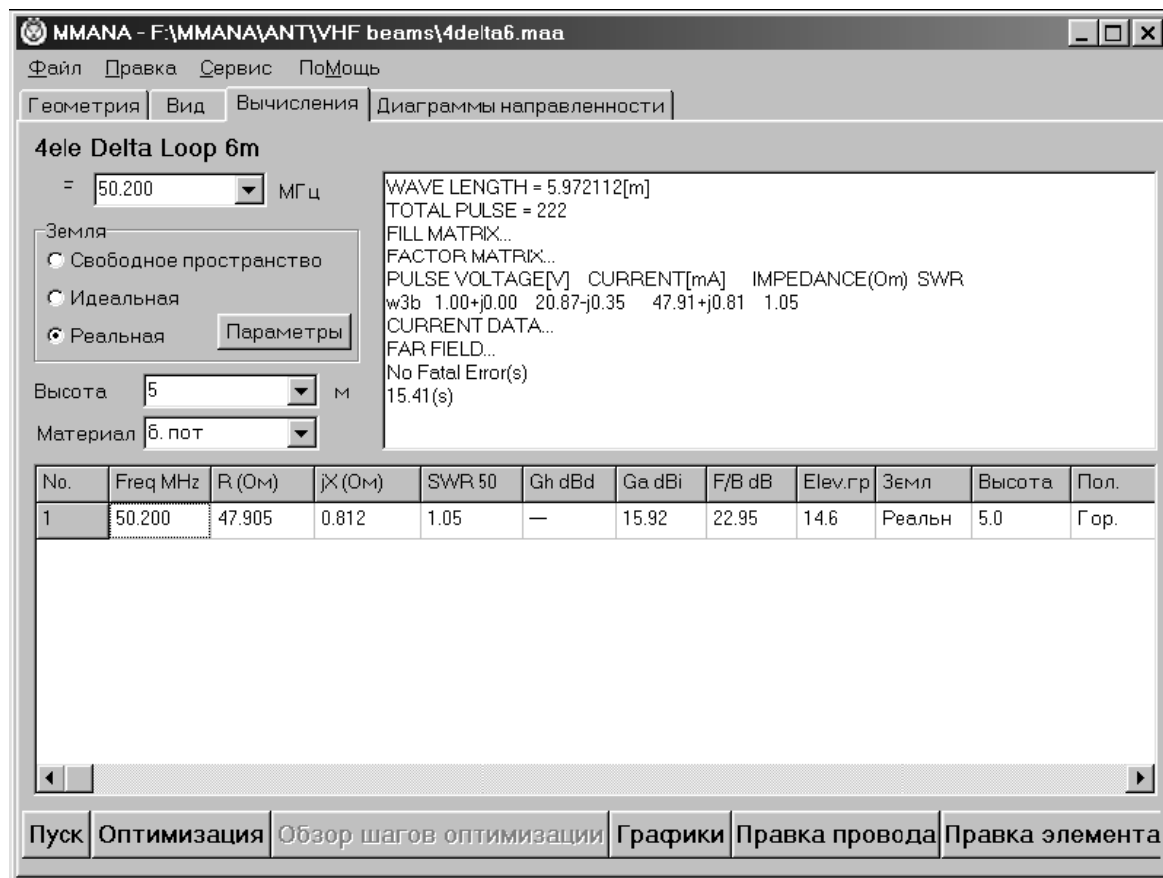


Рисунок 13. Окно закладки **Вычисления**

Закончив ввод описания антенны и нажав кнопку **Пуск** в большой нижней таблице высвечиваются результаты расчета. Результаты выводятся в следующем формате (по столбцам):

- **Freq MHz** – частота.
- **R** – активная часть входного сопротивления, Ом.
- **jX** – реактивная.
- **SWR** – KCB
- **Gh** – усиление относительно полуволнового диполя (дБ), это значение

выводится, только если расчет производится для свободного пространства.

- **Ga dbi** – усиление к изотропному излучателю. Эта единица, будучи привязанной к абстрактной всенаправленной антенне, независимой от высоты и свойств земли, используется во всех таблицах и графиках.

- **F/B db** – отношение уровней излучения вперед/назад.

- **Elev.** –зенитный (вертикальный) угол, под которым расположен максимум излучения антенны.

- **Земл** – тип влияния земли для которого проводилось моделирование.
- **Высота** – высота антенны в метрах над землей.
- **Пол.** – поляризация антенны – горизонтальная или вертикальная.

Для более детального анализа результатов расчета антенны нажимается кнопка **Графики**. В поле **Полоса** устанавливается ширина полосы частот (относительно центральной), в которой необходимо посмотреть параметры. Выбранное значение автоматически устанавливается по горизонтальной оси графика.

Последовательно выбирая закладки **Z**, **KCB**, **Gain/FB**, **ДН** можно наглядно увидеть, как меняются от частоты в заданном диапазоне параметры антенны Кнопка **Поиск резонанса** предназначена для автоматического поиска резонансной частоты антенны (т. е. той, на которой реактивная составляющая ее входного импеданса равна нулю).

Закладка **ДН** выводит разными цветами диаграммы направленности (кривые 1, 2, 3 на рис. 14) антенны для всех частот (шагов сетки) в рассчитанной полосе, а также табличку изменения основных параметров. Это бывает очень полезно при подгонке антенны, когда требуемые характеристики и форма ДН могут оказаться не на центральной частоте, а где-то в стороне. В

этой же закладке в окошке **ДН для поляризаций** можно выбрать для какой поляризации (вертикальной **V**, горизонтальной **H**, их суммы. Если ДН на каких-то частотах не нужен, их можно выключить, щелкнув в строке соответствующей частоты в столбце **On**.

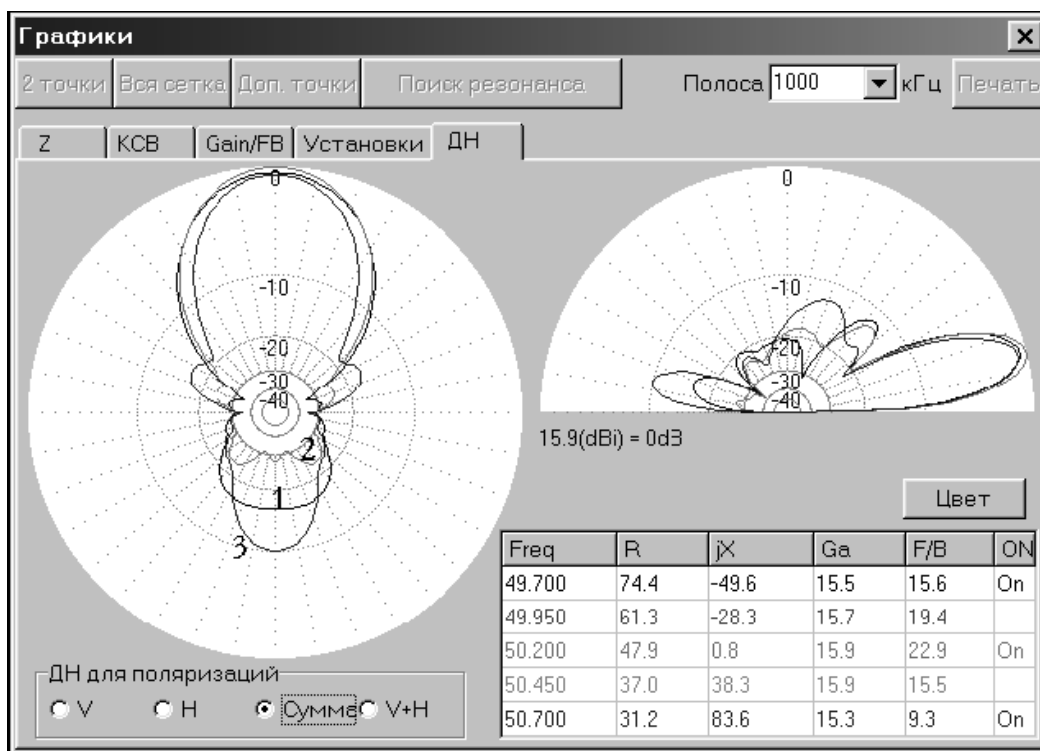


Рисунок 14. Окно закладки **Диаграмма направленности**

Выбрав закладку **Диаграммы направленности** (рис. 15), получим ДН в вертикальной и горизонтальной плоскости и перечисление всех основных параметров антенны. ДН любой антенны является объемной трехмерной фигурой, в общем случае, неправильной формы.

В окошке **ДН для поляризаций** можно выбрать для какой поляризации (вертикальной **V**, горизонтальной **H**, их суммы **V+H**) будут построены ДН.

После того, как получены все параметры антенны в закладке **Вычисления**, можно исправить конструктивные элементы антенны. Это можно сделать и в закладке **Геометрия**, изменяя вручную координаты проводов, но путь этот громоздок и весьма трудоемок. Проще использовать кнопку **Правка**

**провода** и вызвать окно, которое создавать и редактировать антенну только мышью без перебора цифр в закладке **Геометрия**.

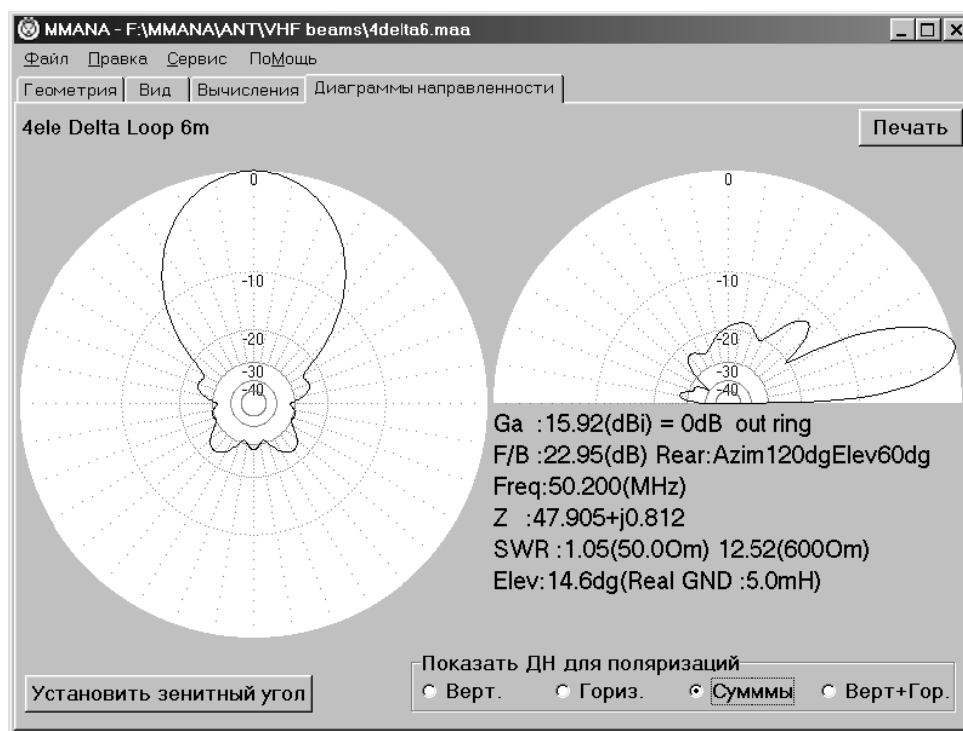


Рисунок 15. Вид диаграммы направленности для суммы вертикальной и горизонтальной поляризаций

В открывшемся окне (рис.16) имеются четыре закладки с очевидным назначением – трехмерный вид антенны, а также двухмерные в каждой из трех плоскостей. В трех последних случаях для облегчения проектирования на изображение накладывается координатная сетка с указанием масштаба.

Кроме очевидных движков **Масштаб** и **Вращать** имеется еще ряд кнопок:

-Первая кнопка (с наклонной белой стрелкой) включает режим редактирования-перетаскивания правой кнопкой мыши существующих проводов. Щелчок – выделение провода (он при этом меняет цвет на красный), щелчок и удержание клавиши нажатой – перетаскивание провода. Причем, если взять выделенный провод за край (курсор совмещается с концом провода и

превращается в крестик – это называется выделением конца провода), то будет перетаскиваться только один его конец, а второй останется на месте. Если же взять середину провода (при этом рядом с курсором появиться небольшой белый прямоугольник), перемещаться будет весь провод параллельно исходному положению.

Электрические соединения при этом не разрываются, то есть будут перемещаться и концы тех проводов, которые электрически соединены с перемещаемым проводом.

- Вторая кнопка (с тонкой диагональной линией) включает режим рисования новых проводов. Необходимо щелкнуть в нужном месте координатной сетки правой кнопкой и, держа ее нажатой, нарисовать провод. С этого действия обычно и начинается рисование новой антенны.

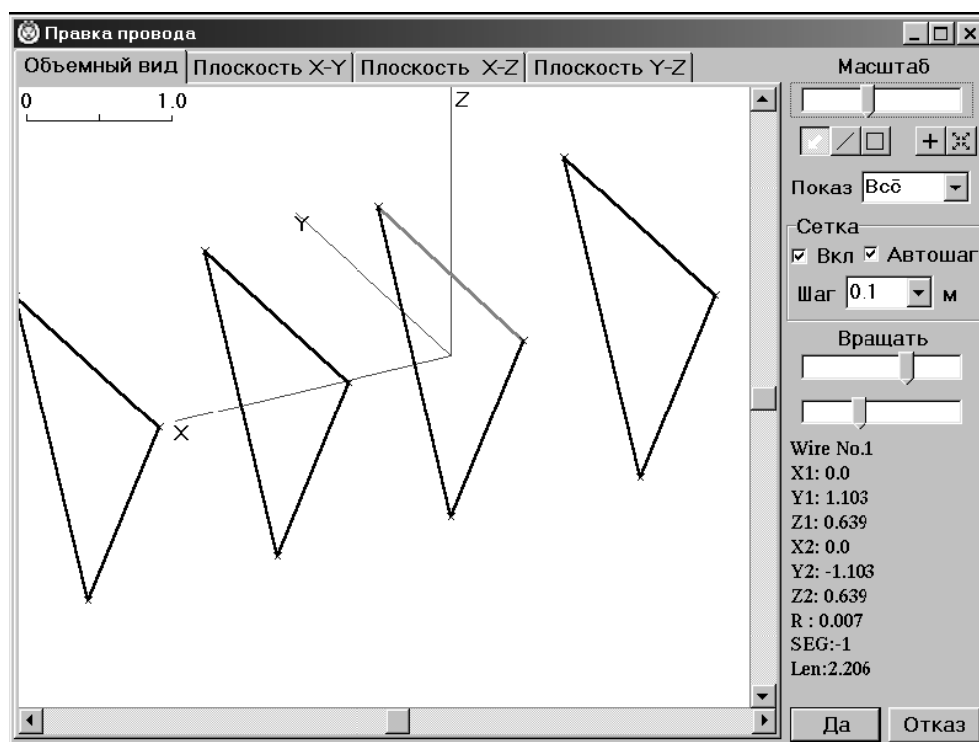


Рисунок 16. Окно закладки **Правка провода**

-Третья кнопка (с квадратиком внутри) аналогична второй, но рисуется не один провод, а сразу «квадрат» или прямоугольник.

-Следующие две отдельно расположенные кнопки относятся к управлению изображением, поэтому работают при выборе любой закладки изображения.

-Четвертая кнопка (с плюсом внутри) устанавливает центр изображения на начало координат ( $X = 0$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 0$ ).

-Последняя пятая кнопка (с четырьмя стрелками по углам) устанавливает нормальный масштаб, помещая центр изображения на геометрический центр антенны.

В меню **Показ** имеется выбор из трех строк: **Все** – показ всех проводов антенны; **Плоск** – показ только тех проводов, которые лежат в одной плоскости с выделенным проводом; **Элемент** – показ только проводов, электрически соединенных с выделенным.

В окне **Сетка** устанавливаются параметры координатной сетки.

Под движками **Вращать** при выделении провода появляется его полное описание, включая его длину.

#### 4. Порядок проведения исследований

Запустить программу MMANA.

***1. Исследование четверть волнового несимметричного вибратора (штыревой антенны)***

*1. Исследование зависимости коэффициента усиления и формы диаграммы направленности от частоты при постоянных геометрических размерах антенны.*

Загрузить файл «Первый».

Убедиться на вкладке **Геометрия**, что длина антенны (параметр Z2 равна  $1/4$  длины волны или 8 см, материал антенны - *медь*, параметры влияния земли - *свободное пространство* и рабочую частоту 450 МГц (вкладка **Вычисления**). Зарисовать антенну, используя вкладку **Вид**.

а) Выполнить вычисления, нажав кнопку **Пуск**. Находясь на вкладке **Вычисления** нажать кнопку **Графики**. Выбрать вкладку **Gain/FB**, установить полосу частот 80 кГц и нажать кнопку **Дополнительные точки**. Перерисовать в тетрадь полученный график коэффициента усиления антенны **Ga** (обозначен черным цветом). Перейти на вкладку **Диаграммы направленности** и зарисовать ДН в двух плоскостях.

б) Вернуться на вкладку **Вычисления**. Установить частоту 900 МГц. Прodelать те же самые операции, что и в пункте «а»).

в) На вкладке **Вычисления** установить частоту 1800 МГц. Прodelать те же самые операции, что и в пункте «а»).

г) На вкладке **Вычисления** установить частоту 3600 МГц. Прodelать те же самые операции, что и в пункте «а»).

д) Просмотреть, как изменяется форма диаграммы направленности при влиянии земли (Установка **Земля - реальная** на вкладке **Вычисления**, а высота антенны *1 метр* над землей).

е) Построить график зависимости коэффициента усиления антенны **Ga** от частоты (450, 900, 1800, 3600 МГц). Сделать выводы о влиянии рабочей частоты на вид ДН и величину коэффициента усиления антенны **Gain/FB**. Сделать вывод о влиянии земли на ДН антенны.

2. *Исследование влияния геометрических размеров антенны на ее основные технические характеристики.*

а) На вкладке **Геометрия** установить длину антенны (параметр Z2) равной 15 см. Установить материал антенны - *медь*, параметры влияния земли - *свободное пространство* и рабочую частоту 900 МГц.

б) Выполнить вычисления, нажав кнопку **Пуск**. Перейти в окно **Графики** (нажав кнопку **Графики**) и получить график коэффициента усиления антенны **Ga** (обозначен черным цветом). Вернуться во вкладку **Вычисления** и открыть вкладку **Диаграммы направленности**. Зарисовать ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

в) Вернуться на вкладку **Геометрия** и установить длину антенны (параметр Z2) равной 10 см. Прodelать все операции согласно пункта «б»).

г) На вкладке **Геометрия** установить длину антенны (параметр Z2) равной 5 см. Прodelать все операции согласно пункта «б»).

д) На вкладке **Геометрия** установить длину антенны (параметр Z2) равной 1 см. Прodelать все операции согласно пункта «б»).

е) Просмотреть, как изменяется форма диаграммы направленности при влиянии земли (Установка **Земля - реальная** на вкладке **Вычисления**, а высота антенны *1 метр* над землей).

ж) Построить график зависимости коэффициента усиления антенны **Ga** от геометрических размеров вибратора (15, 10, 5, 1 см). Сделать выводы о влиянии размеров антенны на вид ДН и величину коэффициента усиления антенны **Gain/FB**. Объяснить наклон графика **Gain**. Сделать вывод о влиянии земли на ДН антенны.

## ***II. Исследование полуволнового симметричного вибратора (диполя)***

*1. Исследование зависимости коэффициента усиления и формы диаграммы направленности от частоты при постоянных геометрических размерах антенны.*

Загрузить файл «Второй».

Убедиться на вкладке **Геометрия**, что длина антенны (параметры Y1 и Y2 равна 1/2 длины волны или 15 см, материал антенны - *медь*, параметры влияния земли - *свободное пространство* и рабочую частоту 450 МГц (вкладка **Вычисления**). Зарисовать антенну, используя вкладку **Вид**.

а) Выполнить вычисления, нажав кнопку **Пуск**. Находясь на вкладке **Вычисления** нажать кнопку **Графики**. Выбрать вкладку **Gain/FB**, установить полосу частот 80 кГц и нажать кнопку **Дополнительные точки**. Перерисовать в тетрадь полученный график коэффициента усиления антенны **Ga** (обозначен черным цветом). Перейти на вкладку **Диаграммы направленности** и зарисовать ДН в двух плоскостях.



б) Вернуться на вкладку **Вычисления**. Установить частоту 900 МГц. Прodelать те же самые операции, что и в пункте «а»).

в) На вкладке **Вычисления** установить частоту 1800 МГц. Прodelать те же самые операции, что и в пункте «а»).

г) На вкладке **Вычисления** установить частоту 3600 МГц. Прodelать те же самые операции, что и в пункте «а»).

д) Просмотреть, как изменяется форма диаграммы направленности при влиянии земли (Установка **Земля - реальная** на вкладке **Вычисления**, а высота антенны *30 метров* над землей).

е) Построить график зависимости коэффициента усиления антенны **Ga** от частоты (450, 900, 1800, 3600 МГц). Сделать выводы о влиянии рабочей частоты на вид ДН и величину коэффициента усиления антенны **Gain/FB**. Сделать вывод о влиянии земли на ДН антенны.

2. *Исследование влияния геометрических размеров антенны на ее основные технические характеристики.*

а) На вкладке **Геометрия** изменить длину вибраторов антенны (параметры Y1, Y2) и сделать равными, соответственно, минус 30 и плюс 30 см. Установить материал антенны - *медь*, параметры влияния земли - *свободное пространство* и рабочую частоту 900 МГц.

б) Выполнить вычисления, нажав кнопку **Пуск**. Перейти в окно **Графики** (нажав кнопку **Графики**) и получить график коэффициента усиления антенны **Ga** (обозначен черным цветом). Вернуться во вкладку **Вычисления** и открыть вкладку **Диаграммы направленности**. Зарисовать ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

в) Вернуться на вкладку **Геометрия** и установить длину антенны (параметры Y1, Y2), соответственно, минус 15 и плюс 15 см. Прodelать все операции согласно пункта «б»).

г) На вкладке **Геометрия** установить длину антенны (параметры Y1, Y2), соответственно, минус 7,5 и плюс 7,5 см. Прodelать все операции согласно пункта «б»).

д) На вкладке **Геометрия** установить длину антенны (параметры  $Y1$ ,  $Y2$ ), соответственно, минус 2,5 и плюс 2,5 см. Прodelать все операции согласно пункта «б»).

е) Просмотреть, как изменяется форма диаграммы направленности при влиянии земли (Установка **Земля - реальная** на вкладке **Вычисления**, а высота антенны *30 метров* над землей).

ж) Построить график зависимости коэффициента усиления антенны **Ga** от геометрических размеров вибратора (60, 30, 15, 5 см). Сделать выводы о влиянии размеров антенны на вид ДН и величину коэффициента усиления антенны **Gain/FB**. Объяснить наклон графика **Gain**. Сделать вывод о влиянии земли на ДН антенны.

### ***III. Исследование направленной антенны типа «Волновой канал» (директорной антенны)***

*1. Исследование зависимости коэффициента усиления и формы диаграммы направленности от частоты при постоянных геометрических размерах антенны.*

Загрузить файл «Третий».

Обратить внимание на конструкцию, антенны, представляющую собой комбинацию полуволнового вибратора, рефлектора(отражателя) и направляющих(директоров) которых может быть от 0 до 2-х десятков. В данном случае представлена антенна волновой канал с двумя директорами.

На вкладке **Геометрия** описываются геометрические размеры каждого элемента антенны. Зарисовать антенну, используя вкладку **Вид**.

Данные антенны позволяют получить усиление порядка 5 - 15 дБ, однако являются достаточно узкополосными.

а) Используя изученную ранее методику измерения параметров снять амплитудно-частотную характеристику антенны (зависимость коэффициента

усиления **Ga** от частоты) в диапазоне частот от 800 до 1200 МГц с шагом 50 МГц. Полученные данные занести в таблицу.

б) Исследовать вид ДН при различных рабочих частотах: 450, 700, 900, 1200 МГц

е) Построить график зависимости коэффициента усиления антенны **Ga** от частоты (800 - 1200 МГц). Сделать выводы о влиянии рабочей частоты на вид ДН и величину коэффициента усиления антенны **Gain/FB**.

2. *Исследование зависимости коэффициента усиления и формы диаграммы направленности от количества направляющих (директоров).*

а) На вкладке **Вычисления** установить материал антенны - *без потерь*, параметры влияния земли - *свободное пространство* и рабочую частоту 900 МГц. Нажать кнопку **Пуск**, зафиксировать коэффициент усиления антенны и зарисовать диаграмму направленности.

б) Убрать одну направляющую (директор). Для этого нажать кнопку **Правка провода**, нажать кнопку редактирования (с белой стрелкой внутри), щелкнуть левой кнопкой мыши по крайнему директору (он окрасится в красный цвет), затем правой кнопкой вызвать контекстное меню и выбрать команду **Удалить провод**. После этого нажать кнопку **Да**. Провести измерения по пункту «а»).

в) Убрать еще одну направляющую (директор). Для этого нажать кнопку **Правка провода**, нажать кнопку редактирования (с белой стрелкой внутри), щелкнуть левой кнопкой мыши по крайнему директору (он окрасится в красный цвет), затем правой кнопкой вызвать контекстное меню и выбрать команду **Удалить провод**. После этого нажать кнопку **Да**. Провести новые измерения по пункту «а»).

г) Сделать выводы по проведенному исследованию.

### 3. *Исследование многоэлементной узконаправленной антенны типа «волновой канал»*

Загрузить файл «Четвертый».

Зарисовать антенну, используя вкладку **Вид**.

Произвести вычисление параметров, перейти на вкладку **Диаграммы направленности** и зарисовать полученную ДН. Просмотреть, как изменяется ДН антенны при отклонении от рабочей частоты на 100 МГц в большую и меньшую сторону. Сделать выводы по проведенному исследованию.

## 5. Содержание отчета

1. Рисунки исследуемых антенн.
2. Рисунки ДН в соответствии с пунктами исследования.
3. Таблицы с расчетными значениями коэффициентов усиления **Ga**.
4. Выводы по каждому разделу исследования

## 6. Контрольные вопросы

1. Что называется фидером? От чего зависит конструкция фидера?
2. Изобразите схематически вид несимметричного вибратора.
3. Поясните работу симметричного вибратора как излучателя.
4. Что понимают под электрической прочностью антенны?
5. Что определяет амплитудная диаграмма направленности?
6. Какова форма диаграммы направленности элементарного электрического вибратора (диполя)?
7. Какая диаграмма направленности называется нормированной?
8. Что показывает диаграмма направленности антенны по мощности?
9. Что подразумевается под шириной главного лепестка диаграммы направленности? Как она определяется?
10. Каков основной показатель ненаправленных антенн?

11. В чем отличие фазовой и поляризационной диаграммы направленности?
12. Что подразумевается под КНД антенны?
13. Что называется КУ антенны?
14. Как вычислить КПД антенны зная ее КУ и КНД?
15. Что называется действующей (эффективной) длиной приемной антенны?
16. Что называется действующей (эффективной) площадью приемной антенны?
17. Что подразумевают под энергетической эффективностью антенны? Как он определяется?
18. Сравните, во сколько раз отличаются КНД двух антенн, если известны их значения в децибелах:  $D_1=20$  дБ и  $D_2=40$  дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. Сов. Радио, 1974, - 536 с.
2. Мануилов Б.Д., Мануилов М.Б. Линейные антенны и решётки. РИС ЮРГУЭС, 2004, - 56 с.
3. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства. Связь, 1977, - 440 с.
4. Ерохин Г.А., Чернышёв О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. Горячая линия - Телеком, 2004, - 491 с.
5. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. М.: Радиософт, 2002. - 80 с.