

**Лабораторная работа 4****ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ**

Цель работы - изучение принципа действия, а также основных характеристик зеркальной антенны в виде параболоида вращения и влияния на них амплитудного и фазового распределений поля в раскрыве. К основным характеристикам антенны относятся: нормированная диаграмма направленности (ДН), коэффициент направленного действия (КНД), коэффициент эллиптичности и поворот большой оси эллипса относительно выбранной координаты и ряд других.

Исследование антенны с синфазным и противофазным возбуждением на основе антенны для системы с моноимпульсным автосопровождением.

Изучение зеркальной антенны со специальной формой диаграммы направленности.

Изучение методики измерения ДН параболических антенн на расстоянии, меньшем допустимого (допустимым считается такое расстояние между исследуемой антенной и передающей, при котором падающую волну можно считать плоской). Изучение двухзеркальной антенны с поворотом плоскости поляризации.

**4.1. Описание макетов и методики эксперимента**

В состав лабораторной работы входят четыре макета, изображенные на рис. 4.1, 4.3, 4.4 и 4.7.

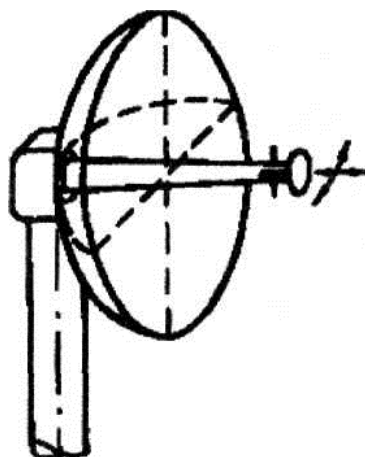


Рис. 4.1. Макет № 1

Макет №1 (рис. 4.1) позволяет изучить свойства антенны с зеркалом в виде параболоида вращения, наиболее часто встречающиеся в технике. Большинство остронаправленных антенн значительных размеров имеют форму именно параболоида вращения. В макете использован простейший облучатель - симметричный полуволновый вибратор с рефлектором. Он расположен на штанге, внутри которой проходит питающий кабель. За зеркалом штанга крепится к поворотному устройству, которое обеспечивает смещение облучателя из фокуса вдоль оси параболоида или перпендикулярно ей на небольшое расстояние. Максимальный угол отклонения оси облучателя от оси параболоида составляет  $\pm 15^\circ$  (рис. 4.2).

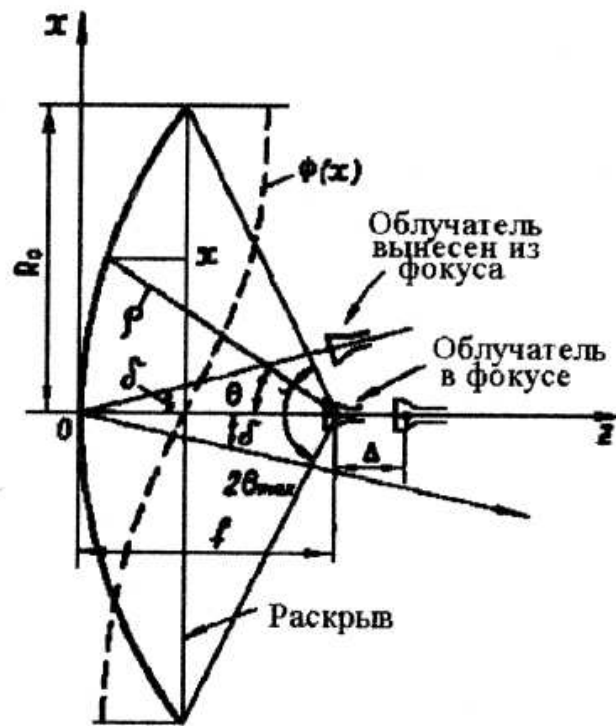


Рис. 4.2. Влияние движения облучателя на фазовые искажения в апертуре

При смещении облучателя в фокальной плоскости в раскрыве возникают фазовые искажения в основном нечетного по отношению к центру зеркала характера. Фазовые искажения в этом случае имеют линейный и кубичный характер. Главный лепесток ДН отклоняется от оси в сторону, противоположную смещению облучателя, а в направлении оси формируется лепесток повышенного уровня, который легко фиксируется во время эксперимента.

Перемещение облучателя вдоль оптической оси зеркала вызывает появление симметричных фазовых искажений по раскрыву зеркала. Если облучатель смещается в сторону зеркала, то фаза поля на краю зеркала отстает от фазы поля в центре, а если от зеркала, то наоборот. Четные фазовые искажения обычно называются "расфокусировкой"; они приводят к расширению главного лепестка ДН, повышению уровня боковых лепестков с одновременным пропаданием нулей, уменьшению КНД. Наиболее сильно фазовые искажения влияют на ДН при равномерном распределении поля по раскрыву. При спадающем к краям амплитудном распределении влияние фазовых искажений значительно слабее, что наглядно иллюстрирует рис. 11.9 в [1, с.288] на примере линейной антенны.

Вынося облучатель от зеркала вдоль фокальной оси, можно создать опережение фазы поля на его краю по сравнению с центром. Это обстоятельство используется при построении метода снятия ДН на уменьшенном расстоянии. Известно, что при снятии ДН из-за конечного расстояния между исследуемой и вспомогательной антеннами по раскрыву первой возникают фазовые искажения, вследствие которых фаза поля на краю отстает от фазы поля в центре зеркала. Поэтому большие зеркальные антенны необходимо располагать на значительном расстоянии от вспомогательной антенны, чтобы фазовые искажения не превосходили допустимой величины ( $\Delta\Phi_1 \leq \pi/8$ ), что усложняет процедуру снятия ДН. Однако возможно с целью уменьшения фазовых искажений на краю облучатель исследуемой зеркальной антенны переместить от зеркала вдоль оптической оси. При этом фазовые искажения из-за конечного расстояния  $\Delta\Phi_1$  и смещения облучателя  $\Delta\Phi_2$  будут иметь разные знаки, а законы распределения фаз по раскрыву почти совпадать. Если теперь потребовать компенсации фазовых искажений на краю зеркала  $\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2$ , то, хотя полной компенсации в других точках не будет, суммарные искажения будут значительно ослаблены. Таким образом удастся уменьшить минимальное расстояние между антеннами в 10-20 раз.

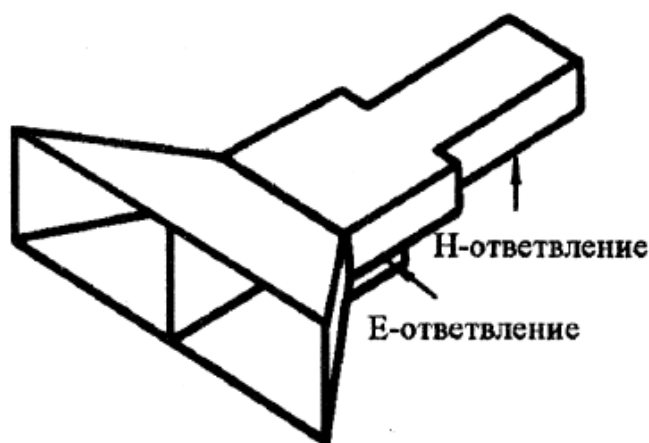


Рис.4.3. Макет №2. Моноимпульсный облучатель

Макет №2 (рис. 4.3) позволяет изучить особенности так называемой моноимпульсной антенной системы. Она используется в радиолокационных станциях для точного определения координат методом равносигнальной зоны. Вообще говоря, равносигнальная зона может быть получена различными способами, например, путем выноса фазового центра облучателя из фокуса и вращения его вокруг фокальной оси (рис. 4.2). Луч, совпадающий с максимумом ДН, описывает при этом коническую поверхность, поэтому такой способ называется коническим сканированием. На фокальной оси антенны (часто ее называют оптической осью) уровень ДН остается постоянным и потому называется равносигнальной зоной. Макет №1 позволяет смоделировать равносигнальную зону в одной плоскости. Для этого следует измерить ДН, вынося облучатель сначала вправо от оси, а затем влево на один и тот же угол. Нормированные ДН, совмещенные на одном графике, дадут пересечение, совпадающее с оптической осью антенны.

Моноимпульсный метод отличается от конического сканирования тем, что облучатель остается неподвижным, а равносигнальная зона получается путем формирования двух ДН - суммарной и разностной. Макет №2 (рис. 4.3) является моделью самостоятельной моноимпульсной антенны (или облучателя зеркальной антенны), формирующей суммарно-разностную ДН в одной плоскости. Он представляет собой решетку из двух рупоров, выходы которых переходят в симметричные входы двойного Т-моста. Если детектор подключен к Е-ответвлению моста, то снимается разностная ДН, так как волны от рупоров складываются в противофазе. Если детектор подключен к Н-ответвлению моста, то снимается суммарная ДН.

Важным параметром моноимпульсной антенны является пеленгационная характеристика, показывающая изменение отношения сигналов, принятых по разностному и суммарному каналам, в зависимости от угла прихода волны. Эта характеристика связывает величину сигнала, подаваемого на автоматические устройства станции, с величиной угла между равносигнальным направлением и направлением на объект. Пеленгационную характеристику стремятся сделать с большим линейным участком, имеющим большую крутизну. Эти требования противоречивы и в зависимости от назначения станции в большей мере выполняется либо первое требование, либо второе. На радиолокационных станциях с моноимпульсными антеннами посылка зондирующего импульса ведется по суммарному каналу, а прием - по суммарному и разностному. В данной лабораторной работе исследования суммарного и разностного каналов ведутся в режиме приема.

Макет №3 (рис. 4.4) моделирует зеркальную антенну с веерной ДН, т.е. достаточно узкую в вертикальной плоскости и имеющую специальную форму в горизонтальной (применительно к данной лабораторной установке). Наиболее часто в технике встречается так называемая косекансная ДН. Антенны с косекансной ДН нашли широкое применение в самолетных радиолокационных станциях кругового обзора и в станциях дальнего обнаружения самолетов. Антенны этого типа обеспечивают в определенном секторе углов независимость величины отраженного сигнала от расстояния до объекта, если последний расположен у поверхности земли.

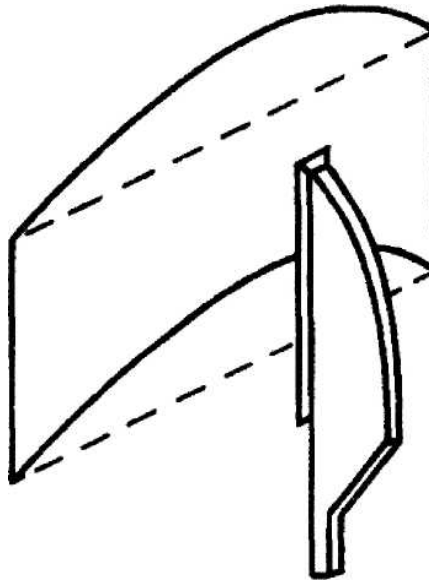


Рис. 4.4. Макет №3. Антенна с косекансной ДН

Действительно, электрическое поле самолетной антенны в дальней зоне может быть записано в виде

$$E = A \frac{f_1(\vartheta) f_2(\varphi) e^{-ikr}}{r}, \quad (4.1)$$

где  $f_1(\theta)$  - ДН в вертикальной по отношению к земле плоскости;

$f_2(\varphi)$  - ДН в горизонтальной по отношению к земле плоскости.

Для того, чтобы в некотором секторе углов  $\theta_1 < \theta < \theta_2$  поле у поверхности земли не зависело от расстояния, необходимо потребовать, чтобы в этом секторе углов функция  $f_1(\theta)$  была пропорциональна  $r$ , где  $r$  - расстояние между антенной и точками земной поверхности (рис. 4.5). Следовательно, при неизменной высоте полета  $h$  должно выполняться условие

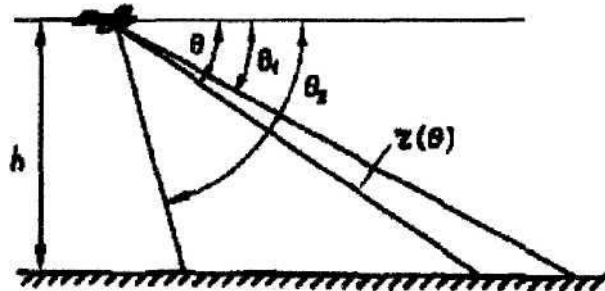


Рис. 4.5. К обоснованию выбора формы косекансной ДН

$$f_1(\vartheta) = r(\vartheta) = \frac{h}{\sin(\vartheta)} = h \operatorname{cosec}(\vartheta) \quad (4.2)$$

Таким образом, косекансная ДН обеспечивает одинаковую радиоосвещенность земной поверхности.

Макет №3 представляет собой цилиндрическое зеркало, левая половина которого (рис. 4.6) есть часть параболического цилиндра, а правая является плавным переходом к круговому цилиндру. В качестве облучателя использована секториальная рупорно-параболическая антенна, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси. Так как линия фазовых центров облучателя совмещена с фокальной линией параболического цилиндра, то в раскрыве параболического цилиндра формируется синфазный фронт. Вторая половина зеркала создает рассеянное поле, которое накладывается на поле синфазного раскрыва, и общая ДН принимает специальную форму.

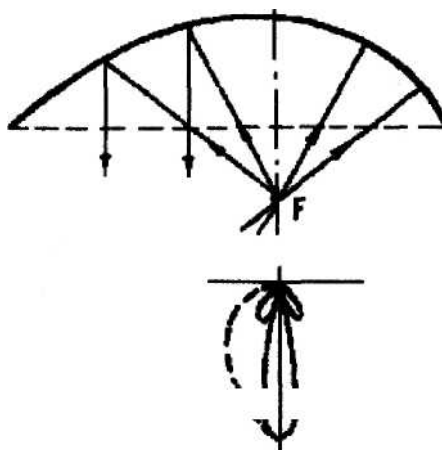


Рис. 4.6. Формирование косекансной ДН

Когда облучатель поворачивается вокруг своей оси, то происходит перераспределение доли энергии, приходящейся на синфазный фронт и на рассеянное поле. Экспериментальным путем можно добиться того, чтобы один склон ДН принял косекансную форму.

При оптимизации тех или иных характеристик зеркальных антенн применяются более сложные двухзеркальные системы. В работе они представлены двухзеркальной антенной с поворотом плоскости поляризации (макет №4, рис. 4.7). Первое зеркало представляет собой параболоид вращения.

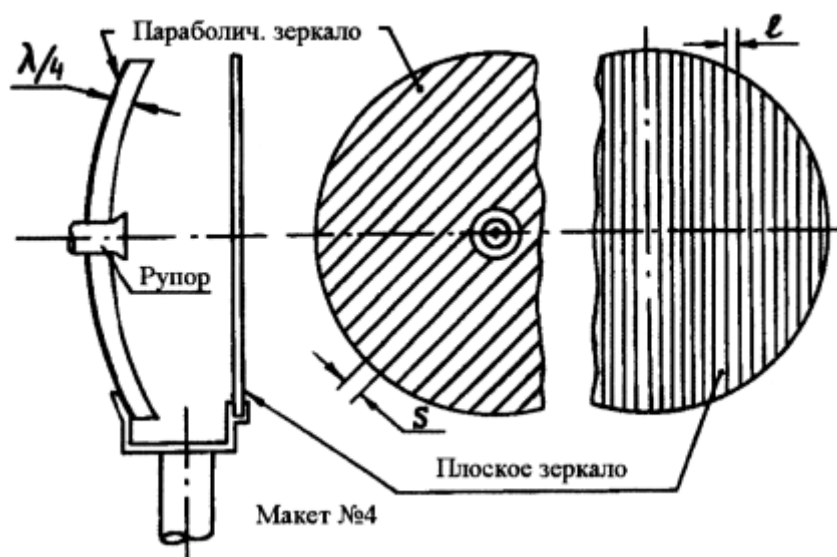


Рис. 4.7 Макет №4. Двухзеркальная антенна с поворотом плоскости поляризации

На зеркало наносится решетка из параллельных металлических полос, имеющих ширину, равную четверти длины волны и шаг  $S \gg \lambda$ . Эта решетка поворачивает плоскость поляризации на  $90^\circ$ . Второе зеркало - плоское - состоит из решетки параллельных тонких проводов с шагом  $l \ll \lambda$  и расположено на таком расстоянии от первого, чтобы зеркальное отображение облучателя находилось в фокусе 1-го зеркала. Провода второго зеркала располагаются параллельно вектору  $E$  облучателя и под углом  $45^\circ$  к ребрам решетки первого зеркала. Поле облучателя отражается от плоского зеркала и падает на первое, которое формирует игольчатую ДН и одновременно поворачивает плоскость поляризации на  $90^\circ$ . Так как вектор  $E$  теперь перпендикулярен проводам второго зеркала, последнее слабо влияет на это поле (рис. 4.8). Такая антенна обладает рядом положительных качеств. Так, в этой антенне существенно меньше сказывается реакция зеркала на облучатель; она имеет уменьшенные габариты (в направлении оси) по сравнению с антенной однозеркальной; облучатель антенны расположен непосредственно за основным зеркалом, что существенно сокращает

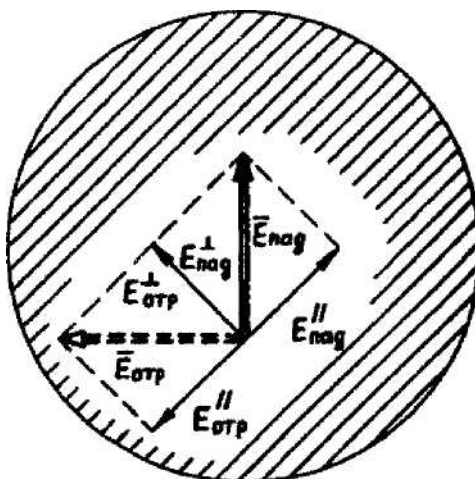


Рис 4.8. Поворот плоскости поляризации

длину питающего тракта; качание главного луча ДН возможно путем поворота относительно легкого плоского зеркала из тонких проволок.

#### 4.2. Расчетное задание

1. Рассчитать и построить ДН параболической антенны по формуле

$$F(\vartheta) = \frac{2J_1(kR_0 \sin(\vartheta))}{kR_0 \sin(\vartheta)} \quad (4.3)$$

где  $J_1(x)$  - функция Бесселя первого порядка;  $R_0 = 130\text{мм}$  - радиус раскрыва зеркала;  $\theta$  - угол между осью антенны и направлением в точку наблюдения;  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda = 3.2\text{см}$ .

Оценить по графику ширину ДН по половинной мощности и сравнить ее с величиной, полученной согласно формуле

$$\Delta\vartheta_{0.5} \approx \frac{70^\circ \lambda}{2R_0} \quad (4.4)$$

2. Рассчитать смещение облучателя  $\Delta$ , обеспечивающее компенсацию фазовых искажений, по формуле

$$\Delta = \frac{f^2}{r} \left[ \frac{r}{r-f} + \left( \frac{2R_0}{4f} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

где  $f = 100\text{мм}$  - фокусное расстояние зеркала;  $r = 1100\text{ мм}$  - расстояние между антеннами.

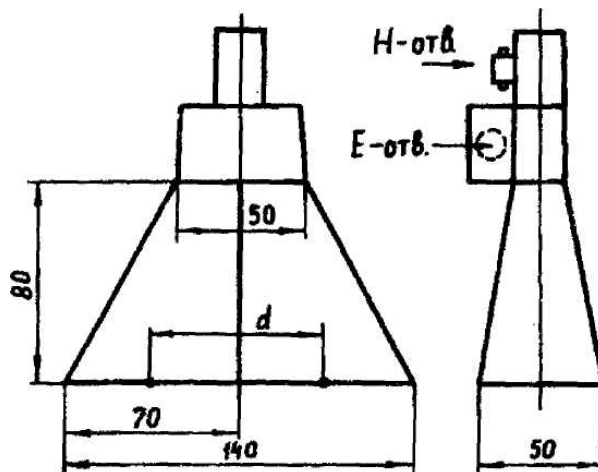


Рис. 4.9. Геометрические размеры моноимпульсного облучателя

3. Рассчитать и построить в декартовой системе координат ДН зеркала специальной формы. ДН рассчитывается при значениях угла  $\theta$  от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  (см. рис. 45) по формуле:

$$f(\theta) = h \operatorname{cosec}(\theta) \quad (4.6)$$

При построении ДН пронормировать по максимальному значению (в пределах выбранных углов).

4. Рассчитать и построить в декартовой системе координат суммарную и разностную ДН антенны для моноимпульсной локации. Геометрия антенны и основные размеры (в мм) приведены на рис. 5.9. ДН антенны может быть записана в виде произведения

$$F_E(\theta) = F_1(\theta) F_2(\theta) \quad (4.7)$$

где  $F_1(\theta)$  - ДН одиночного рупора в плоскости вектора  $H$ ,  $F_2(\theta)$  - ДН решетки из двух ненаправленных излучателей, размещенных в центре апертуры каждого рупора (рис. 4.9).

ДН одиночного рупора в плоскости вектора  $H$  в предположении отсутствия фазовых искажений в апертуре может быть рассчитана так же, как и ДН открытого конца волновода [1, с.361-362], по формуле

$$F_1(\vartheta) = \frac{\cos \vartheta \cos(0.5ka \sin \vartheta)}{1 - \left( \frac{0.5ka \sin \vartheta}{\pi/2} \right)^2} \quad (4.8)$$

где  $k=2\pi/\lambda$ ;  $a$  - размер апертуры рупора в плоскости вектора  $H$ ; угол  $\theta$  отсчитывается от продольной оси антенны,

ДН решетки из  $N$  ненаправленных излучателей рассчитывается по формуле (сравните с [1, с.292-293])

$$F_N(\vartheta) = \frac{\sin \Psi}{N \sin(\Psi/N)}, \quad \Psi = 0.5Nkd \left( \sin \vartheta - \frac{\Delta\Phi}{kd} \right)$$

где  $N$  - число излучателей антенны (в нашем случае  $N=2$ );  $d$  - расстояние между излучателями;  $\Delta\Phi$  - фазовое запаздывание, которое выбирается в соответствии с тем, для какого канала - суммарного или разностного - рассчитывается ДН, угол  $\theta$  также отсчитывается от оси рупора.

### 5.3. Экспериментальная часть

#### *Требования к технике безопасности при работе на стенде*

1. К работе на стенде допускаются лица, ознакомленные с программой проводимых работ и прошедшие общий инструктаж по технике безопасности в лаборатории кафедры АУиРРВ.

2. Для исключения возможности СВЧ облучения смотровая дверка безэховой камеры имеет блокировку анодного напряжения генераторов. Категорически запрещается дотрагиваться до кнопок блокировки.

3. При любой возникшей неисправности в стенде немедленно обращаться к дежурному лаборанту либо преподавателю. Категорически запрещается пытаться самостоятельно исправлять возникшие дефекты.

#### *Задание к экспериментальной части*

1. Снять ДН параболоида вращения (макет №1):
  - а) снять ДН при облучателе, расположенном в фокусе;
  - б) снять ДН той же антенны при облучателе, вынесенном вдоль фокальной оси на величину  $\Delta$ , соответствующую домашнему расчету;
  - в) снять ДН (макет №1) еще при двух положениях облучателя на фокальной оси,

смещая его в сторону зеркала и от него относительно положения п. 1б (величина смещения согласовывается с преподавателем).

2. Снять ДН макета №1 при смещении облучателя из фокуса перпендикулярно оптической оси зеркала. Снимаются две ДН при отклонении облучателя от оси в обе стороны на один и тот же угол. Нормированные ДН построить на одном графике, определить направление, соответствующее биссектрисе угла между двумя максимумами. Полученное значение угла (по шкале поворотного стола) сравнить с направлением максимума, полученным в п. 1а.

Все измерения проводятся на длине волны  $\lambda=3,2$  см. Отсчет углов проводится по шкале, нанесенной на лимбе поворотного стола. Все диаграммы снимаются в пределах не меньше, чем  $\pm 20^\circ$  от максимума. Главный лепесток измеряется с шагом  $2^\circ$ . В области боковых лепестков допускается увеличение шага, однако все характерные минимумы и максимумы должны быть отмечены. На каждом макете имеется своя детекторная секция. Амплитудная характеристика детектора близка к квадратичной. Это следует учесть, поскольку все ДН должны быть построены по полю  $E(\theta)/E_{max}$ . Перед началом эксперимента проверить поляризацию передающей антенны - она должна соответствовать основной поляризации облучателя. При обработке результатов эксперимента у всех построенных ДН должны быть специально отмечены ширина по половинной мощности, направление максимума по лимбу поворотного стола, уровень наибольшего бокового лепестка.

3. Снять суммарную и разностную ДН моноимпульсной антенны. Методика та же, что и в пп. 1,2. ДН должны быть построены по полю на одном графике в нормированном виде, положения максимума суммарной ДН и минимума разностной отмечены особо.

4. Снять ДН зеркала специальной формы при заданном положении облучателя.

5. Исследовать ДН двухзеркальной антенны.

Пункты 4 и 5 выполняются по индивидуальным заданиям, полученным от преподавателя.

#### 5.4. Указания к составлению отчета

Отчет должен содержать:

- 1) расчетные и экспериментальные ДН параболической антенны (п.1), вычерченные на одном графике (по полю);
- 2) экспериментальные ДН по п.2;
- 3) расчетные и экспериментальные ДН (по суммарному и разностному каналам) антенны для моноимпульсной радиолокации, совмещенные на одном графике;
- 4) расчетную и экспериментальную ДН зеркала специальной формы, которые совмещаются на одном графике;
- 5) выводы по каждому пункту задания (если экспериментальные результаты значительно отличаются от расчетной модели, то должны быть выявлены причины несоответствия и степень их влияния).

#### 5.5. Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой ширина ДН в главных плоскостях параболической антенны и ее размеры?
2. Как связано распределение поля в раскрыве параболоида с ДН облучателя?
3. Что такое фазовый центр и фазовая характеристика антенны? Какое значение они имеют для облучателей параболических антенн?
4. Как связаны функции распределения амплитуды и фазы поля в раскрыве зеркала с формой ДН?
5. Изобразите распределение фазы поля в раскрыве при небольшом смещении облучателя из фокуса в фокальной плоскости. Как такое смещение влияет на характеристику излучения?
6. Опишите вибраторные облучатели параболических антенн.



7. Опишите способы устранения реакции зеркала на облучатель.
8. Как можно уменьшить УБЛ ДН параболических антенн?
9. Изобразите распределение фазы поля в раскрыве параболоида, когда облучатель смещен из фокуса вдоль оптической оси.
10. Опишите принцип работы исследуемой моноимпульсной антенны.
11. Коэффициент направленного действия параболической антенны равен 100, рабочая длина волны 3 см. Определить диаметр зеркала с учетом реальных величин КИПа.
12. Параболическая антенна имеет диаметр  $12\lambda$ . Фаза поля в раскрыве распределена линейно, и на краю зеркала фазовый сдвиг по отношению к центру составляет  $2\pi$ . Найти направление максимального излучения такой антенны.
13. Опишите принцип действия зеркальной антенны с косекансной диаграммой направленности, исследуемой в данной работе.
14. Как происходит поворот плоскости поляризации в двухзеркальной антенне?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988. С.360-365, 371-377, 379-385, 393-394.
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. - М.: Энергия, 1975. С.415-423, 431-440, 443-452, 459-460.