

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

Ордена Трудового Красного Знамени  
Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 112

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗОМЕТРИЧЕСКОГО  
МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЖЕСТКОСТИ И КОНТРОЛЯ  
ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

И.А. Дугин

Д.А.Дмитренко.

Л.К. Иванникова

Горький — 1977 г.

## **А н н о т а ц и я**

Исследуется возможность оценки по изменению фазы принимаемого антенной сигнала интегральных искажений геометрии антенной системы, связанных с механическими и тепловыми деформациями, а также возможность повышения точности установки элементов антенн переменного профиля и отладки поверхности вантовых телескопов.

Жесткость конструкции зеркальных антенн, т.е. способность сохранять геометрические параметры в процессе переориентации в пространстве или при значительных колебаниях температуры нагрева элементов, является одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность зеркала и ограничивающих размеры телескопов или их предельную длину волны. Рефлекторные антенны других типов, например, антенны переменного профиля (АПП), состоящие из множества отдельных отражателей требуют тщательной установки всех элементов в расчетные точки для получения максимально возможной эффективной площади. В любом случае для уменьшения ошибок измерений необходимо установить расхождение между истинным и расчетным профилем зеркала и по возможности устранить или контролировать его. Для этой цели применяются различные методы — механические, геодезические, радиотехнические (в том числе фазометрические), радиоастрономические (см., например, [1]), обычно используемые при изготовлении, установке и юстировке антенны и требующие размещения дополнительных устройств (шаблонов, реперов, модуляторов) на поверхности рефлектора, изменения положения элементов поверхности или замены облучателей калибровочными антеннами. Из известных нам методов непосредственно по принимаемому антенной сигналу производилась юстировка поверхности Большого пулковского радиотелескопа (БПР) [2], радиотелескопов "РАТАН-600" и РТ-25 (НИРФИ). Один из наиболее точных методов — автоколлимационный — также применяется в основном для юстировки АПП; наиболее эффективен он для антенных систем перископического типа.

В данной статье для оценки искажений геометрии антенной системы, связанных с внешними нагрузками и тепловым солнечным излучением, предлагается использовать хорошо известный фазометрический метод, не требующий, однако, внедрения в исследуемую антенную систему и поэтому позволяющий контролировать некоторые параметры зеркала или положение отдельных элементов АПП непосредственно в процессе измерений; кроме того, фазометрический метод является, по-видимому, наиболее простым и надежным радиотехническим методом отладки поверхности вантовых телескопов [3]. Основное его преимущество в том, что влияние изменения поверхности зеркала на интегральные характеристики антенны оценивается непосредственно по выходному сигналу, а не косвенными расчетами; проводя измерения при различных внешних условиях или при различных положениях зеркала можно выделить диапазон частот, при работе в котором необходимо учитывать реакцию антенной системы на внешние воздействия. На основе теоретических расчетов показано, что контролируя изменение фазы принимаемого антенной сигнала относительно опорного, можно оперативно оценить соответствующее изменение усиления антенны и, если это предусмотрено, произвести необходимую коррекцию настройки элементов системы; приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований.

### 1. Оценка жесткости осесимметричных зеркальных антенн.

Рассматривая поле в районе фокуса параболоида при падении на него плоской волны [4, 5], легко заметить следующие характерные особенности: фаза поля вдоль оси зеркала меняется по линейному закону с коэффициентом наклона  $K$ <sup>\*)</sup>, в то время как амплитуда поля в окрестности точки фокуса спадает достаточно плавно. Отсюда следует,

\*) Расчетное значение  $K$  при отношении фокусного расстояния к диаметру  $f/D = 0,4$  равно 0,74.

что при прецизионных измерениях, когда требуется погрешность определения уровня выходного сигнала менее  $2 + 5\%$ , зафиксировать смещение точки фокуса по изменению фазы сигнала гораздо проще и точнее, чем по изменению его интенсивности. Оценки [4] показывают, что уменьшение интенсивности, вызванному искажением профиля зеркала, например, на  $5\%$  соответствует изменение фазы принимаемого сигнала на  $64^\circ$  ( $\sim 0,18 \lambda$ ), измерить которое не представляет особого труда. Таким образом, регистрируя измерение фазы сигнала в процессе измерений, можно повысить точность полученных результатов либо при последующей обработке, либо коррекцией положения элементов антенной системы в ходе эксперимента.

Расчеты [5] показывают, что источник излучения не обязательно должен находиться в дальней зоне антенны: даже при значительных сокращениях, когда число Френеля  $N$  может достигать величины  $(0,3 + 1) D / \lambda$ , изменение фазы в районе главного максимума распределения вдоль оси остается линейным (изменяется лишь значение коэффициента  $K$ ), сильные искажения наблюдаются только в областях первых минимумов. Поэтому, фокусируя зеркало на источник излучения, расположенный в зоне Френеля можно проводить измерения аналогично случаю с источником в дальней зоне. Правда, фокусировка зеркала требует перемещения облучателя (или контррефлектора в двухзеркальных антеннах) на расстояние до нескольких длин волн, что не всегда предусмотрено в конструкции антенны. В таких случаях перефокусировку можно исключить, выбрав точку расположения источника таким образом, чтобы облучатель находился в пределах главного максимума распределения поля вдоль оси зеркала. Потери сигнала при этом несущественны, так как обычно опорный сигнал много слабее сигнала антенны. Если же поместить облучатель в область первого минимума распределения поля, то резко повысится точность, поскольку наклон кривой изменения фазы  $K$  в минимуме может значительно превосходить значение  $K$  в районе максимума интенсивности.

На рис. 1 показаны экспериментальные распределения интенсивности и фазы сигнала вдоль оси 7-метровой двухзеркальной антенны  $f / D = 0,4$  на волне 10 см; источ-

ник находился в 10 раз ближе условной границы дальней зоны; при перефокусировке перемещался только рефлектор. При измерениях не предпринималось никаких мер для устранения рассогласования облучателя, чтобы определить влияние переотражений энергии между облучателем и зеркалами на распределение фазы в фокусе. Видно, что в районе максимума изменение фазы можно считать практически линейным с  $K = 1,8^+$ ). Модуляция фокального пятна (рис. 1а) немного искажает фазовое распределение, нарушая линейность в минимумах интенсивности, причем на "склоне" пятна модуляция глубже, а изменение фазы замедляется, на другом "склоне" фаза в минимумах модуляции меняется быстрее, чем в среднем по фокальному пятну. В минимумах фокального пятна значение  $K$  увеличивается по сравнению с  $K$  в максимуме.

Таким образом, экспериментальные данные качественно согласуются с расчетными. Учитывая возможность искажений распределений амплитуды и фазы в реальных антеннах, в методику эксперимента необходимо вводить калибровку характеристик поля в фокусе в процессе проведения измерений.

В качестве примера рассмотрим возможность обнаружения тепловых деформаций зеркала фазометрическим методом. Будем считать, что искажения формы параболоида могут происходить двумя путями: 1) отклонение ферм каркаса от расчетных положений при колебаниях их температуры и 2) прогиб листов, из которых собрана поверхность. В первом случае образуется новое тело вращения, которое можно аппроксимировать параболоидом с фокусным расстоянием  $f = f_0 \pm \Delta f$  (рис. 2а, знак поправки  $\Delta f$  определяется отклонением температуры ферм в ту или другую сторону от  $T_0$  — температуры, при которой были изготовлены детали антенны). Во втором случае можно приб-

+) Отличие от теоретического значений  $K$  объясняется тем, что в расчетах [4, 5] рассматривалась однозеркальная антенна и не учитывалось влияние приемных элементов (облучателей).

лженно принять, что фокус сместится на  $\Delta f = \varepsilon / 2$ , где  $\varepsilon$  — максимальное отклонение листа от расчетной поверхности (рис. 2 б). Величина  $\Delta f$  связана линейным соотношением с фазой сигнала; поэтому, измерив изменение фазы при определенном перепаде температуры  $\Delta T$  и определив по нему смещение точки фокуса  $\Delta f$ , можно характеризовать "развал" зеркала коэффициентом  $\delta (T^{\circ}) = \Delta f / \Delta T$ , указывающим величину смещения фокуса при отклонении температуры на  $1^{\circ}$  от  $T^{\circ}_{\text{сред}}$ ; график зависимости  $\delta(T^{\circ})$ , снятый в широком диапазоне температур, определит шкалу ошибок, допускаемых при измерениях в меняющихся условиях на дачной длине волны (такой же коэффициент можно ввести для характеристики "развала" зеркала от угла поворота (механические деформации)). На рис. 3 показан график изменения фазы принимаемого антенной сигнала при ее медленном остывании от  $30^{\circ}$  до  $20^{\circ}$ . Исследовалась 7-метровая антенна, стоявшая неподвижной в течение всего цикла измерений, зеркало освещалось Солнцем практически равномерно. Источник излучения ( $\lambda = 10$  см) устанавливался на вышке в ближней зоне, и антенна фокусировалась на него. Смещение максимума за длительный промежуток времени (несколько часов при закате Солнца) составило 5–6 мм, т.е.  $\delta (25^{\circ}) \approx 0,5\text{--}0,6$  мм/град; в то же время при закрытии Солнца облаками наблюдался "мгновенный" перепад температуры поверхности зеркала, достигавший  $10^{\circ}\text{--}15^{\circ}$  и вызывавший смещение максимума на 2–3 мм ( $\delta (35^{\circ}) \approx 0,2$  мм/град). Если считать, что коэффициент  $\delta$  характеризует общую реакцию антенны на колебания температуры, а  $\delta_2$  только прогиб листов поверхности, то можно сделать вывод о сравнимости ошибок вносимых в результаты измерений изменениями формы несущего каркаса и отражающей поверхности в данном диапазоне температур. Для более точных измерений, учитывающих, например, изменение длины тяг, неравномерность нагрева или другие факторы, необходимо проводить более тщательных контроль температуры или натяжки тех или иных элементов конструкции одновременно с измерениями фазы при разнообразных внешних воздействиях. Однако,

как следует из приведенных данных, даже грубые оценки жесткости антенны позволяют определить предельную длину волны или возможные ошибки измерений при проведении экспериментов на более коротких волнах в аналогичных погодных условиях, что указывает на эффективность примененного метода.

## 2. Контроль формы поверхности рефлекторных антенн.

Как уже указывалось, при подготовке к работе антенн с отражающими поверхностями расчлененного типа (в частности АПП) основной задачей является установка отдельных элементов поверхности в положения, соответствующие расчетной кривой. Большинство методов юстировки определяют геометрическое расположение щитов, хотя ясно, что наиболее верный результат получится при отладке поверхности непосредственно по принимаемому сигналу. Для определения возможности обнаружения дефектов установки отражающих щитов с помощью автоколлимационного метода, был проведен расчет распределения поля в фокусе антенны с размерами  $25 \times 2$  и фокусным расстоянием 150 м, состоящей из 17 элементов (рис. 4а, модель перископического радиотелескопа РТ-25 НИРФИ,  $\lambda = 4$  мм). На рис. 4б, в приводятся теоретические зависимости интенсивности и фазы сигнала в фокусе от смещения вдоль оси антенны центрального и одного из крайних щитов (облучение равномерное). Наиболее интересный результат — наличие экстремумов фазы, причем при максимуме сигнала скорость изменения фазы максимальна. Таким образом, за счет более высокой точности фазовых измерений можно повысить точность юстировки поверхности (аналогичные кривые можно получить и для поворота щитов в различных плоскостях).

С появлением вантовых параболических рефлекторов [3] поверхность которых формируется системой оттяжек (тросов), обеспечивающих нужное пространственное расположение опорных точек обшивки зеркала, возникла необходимость измерять среднее отклонение точек поверхности от параболы после сборки антенны. На рис. 5а изображен один из 12-ти секторов поверхности первого 12-метрового вантового радиотелескопа НИРФИ, кружками отмечены опорные



точки крепления оттяжек. Как показали исследования, механическими методами опорные точки можно выводить в нужное положение с достаточно высокой точностью, но общее среднеквадратичное отклонение поверхности, измеренное радиоастрономическими методами, в 1,5 раза превысило величину среднеквадратичного отклонения опорных точек. Это произошло потому, что значительные расстояния между оттяжками ( $\sim 1-1,5$  м) заполняются жесткой металлической сеткой, которой далеко не всегда удается придать заданную форму, а поэтому узлы крепления оттяжек в общем-то не занимают оптимального положения. Приводя аналогию с АПП, можно заключить, что измеряя фазу сигнала при изменении длины одного из тросов, возможно вводить опорные точки обшивки в оптимальное положение. Предварительные исследования эффективности фазометрии в применении к вантовой конструкции на волне 10 см показали, что измерение фазы принимаемого антенной сигнала позволяет определить изменение усиления из-за дефекта поверхности, эквивалентное смещению максимума фокального пятна на 0,2 мм ( $0,002 \lambda$ ); на рис 5б приведена запись на ленте самописца изменения общего сигнала (антенна плюс опорный) при смещении облучателя на  $\Delta x = \pm 5$  мм (калибровка) и при отклонении опорных точек 1 и 2 одного сектора от оптимального положения примерно на 1 см — величину средней ошибки поверхности. Отклонение опорных точек 1, 2 и 3 на одну и ту же величину вызывало различное изменение фазы (рис. 5б) согласно закону распределения поля в раскрыве; при уровне облучения края зеркала  $\sim 2-3\%$ , воздействие на узел 3 практически не вызывало изменений, несмотря на то, что общая отклоняемая площадь сетки была больше, чем в узле 1; воздействие на узлы 4 и 5, находящиеся на радиальном напряженном тросе, приводило к искажению формы нескольких секторов, т.е. изменялась геометрия всего зеркала, при этом абсолютное изменение фазы вдвое превосходило величину сдвига фазы при дефекте в узле 1, знак менялся на противоположный. К сожалению, наличие экстремума фазы не было исследовано из-за необходимости изменений в конструкции, нежелательных во время проведения первых радиоастрономических измерений парамет-

ров антенны; косвенные данные – отсутствие или уменьшение изменения фазы при идентичном воздействии на точку I других секторов зеркала – могут служить лишь некоторым свидетельством существования экстремума.

Таким образом, предварительные результаты применения фазометрического метода к отладке вантовых зеркал можно считать положительными, хотя ясно, что необходимы более детальные исследования как экспериментальные, так и теоретические.

### 3. Проведение эксперимента.

Схема эксперимента может быть различной: в зависимости от используемого источника излучения опорный сигнал может вводиться в тракт антенны как непосредственно от источника (генератора), так и от дополнительной антенны. Техника фазометрических измерений достаточно хорошо известна и подробно на ней останавливаться не будем; здесь на рис. 6 а, б приводятся две возможные схемы измерений с подвижным и фиксированным источниками. На рис. 6 а показана схема эксперимента, примененная для оценки предельных частотных возможностей двухзеркальных 7-метровых антенн НИРФИ и исследования 12-метрового вантового телескопа. Схема рис. 6 б предназначена в основном для оценки механических деформаций зеркала от угла поворота антенны. Из трудностей, проявившихся во время проведения описанных исследований, отметим только необходимость калибровки электрической длины соединительных ВЧ-кабелей при длительных измерениях, пренебрежение которой может привести к большим ошибкам.

Авторы благодарны Н.М.Цейтлину за полезные советы и интерес к работе.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н.А.Есепкина, Д.В.Корольков, Ю.Н.Парийский.  
Радиотелескопы и радиометры, "Наука". М., 1973 г.
2. Г.Б.Гельфрейх и др.  
Известия ГАО, № 185, 1970, 202.
3. Н.В.Бахарев, В.Н.Глазман, И.В.Мосалов.  
Препринт НИРФИ № 63, Горький, 1974 г.
4. Guiss H., G.Ries, AFU, Band 23(1969), N.10,  
481.
5. Н.А.Дугин, Д.А.Дмитренко.  
Изв. ВУЗов. Радиофизика, XIX, № 7, 1976, 1081.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1. Распределение интенсивности (а) и фазы (б) сигнала вдоль оси двухзеркальной антенны при расположении источника излучения в 10 раз ближе условной границы дальней зоны.
- Рис. 2. Возможные искажения профиля параболического рефлектора.
- Рис. 3. Изменение фазы принимаемого антенной сигнала при изменении температуры металла конструкции.
- Рис. 4. Изменение интенсивности и фазы поля в фокусе антенны переменного профиля при смещении одного из элементов рефлектора.
- Рис. 5. а) Схема одного сектора поверхности вантового зеркала.  
б) Запись изменения фазы сигнала при воздействии на различные точки крепления оттяжек к обшивке поверхности.
- Рис. 6. Схема эксперимента (обозначения: АТТ - аттенюатор, ЛПД - линия переменной длины, Пр - приемник).

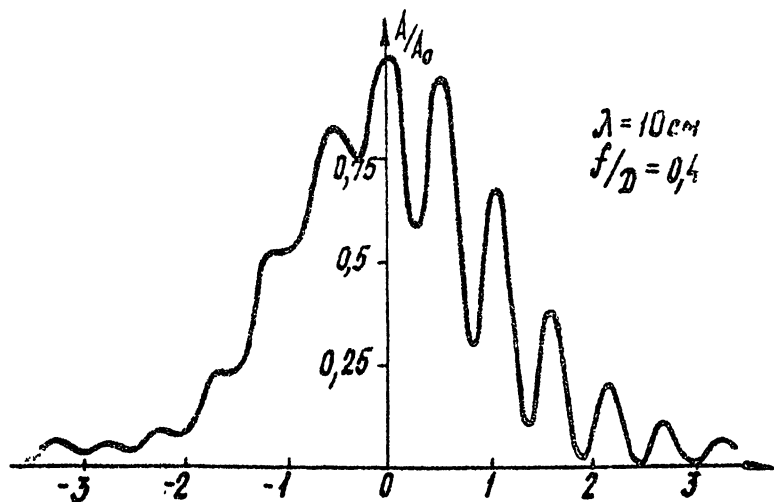


Рис. 1 а

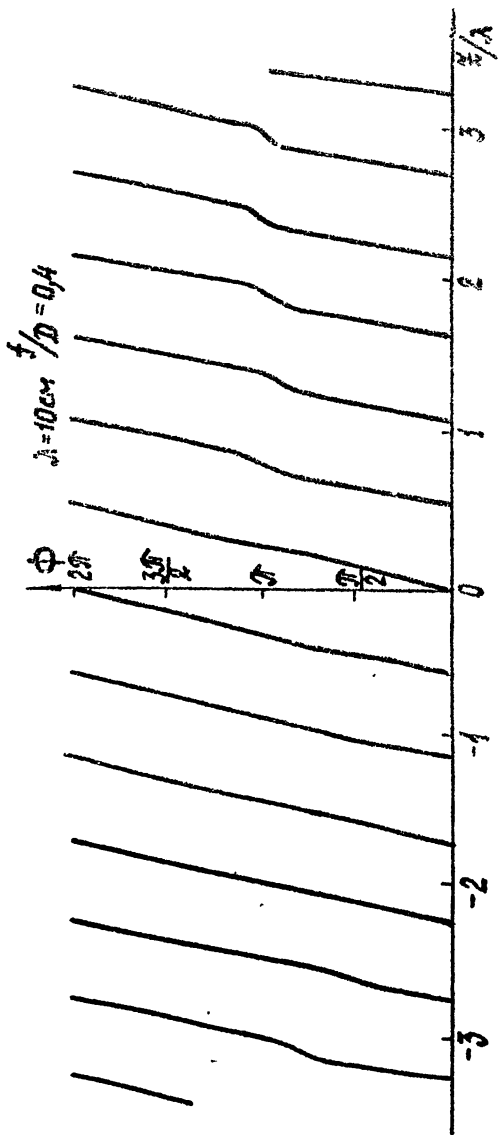


Рис. 1 6

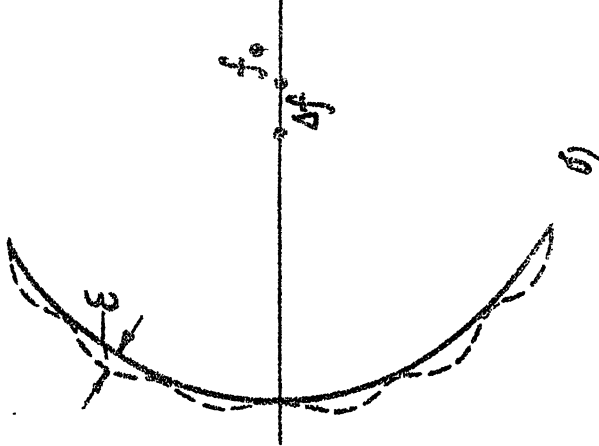
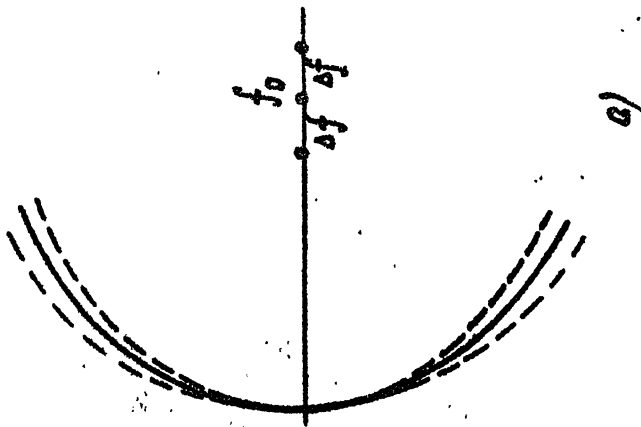


Рис. 2

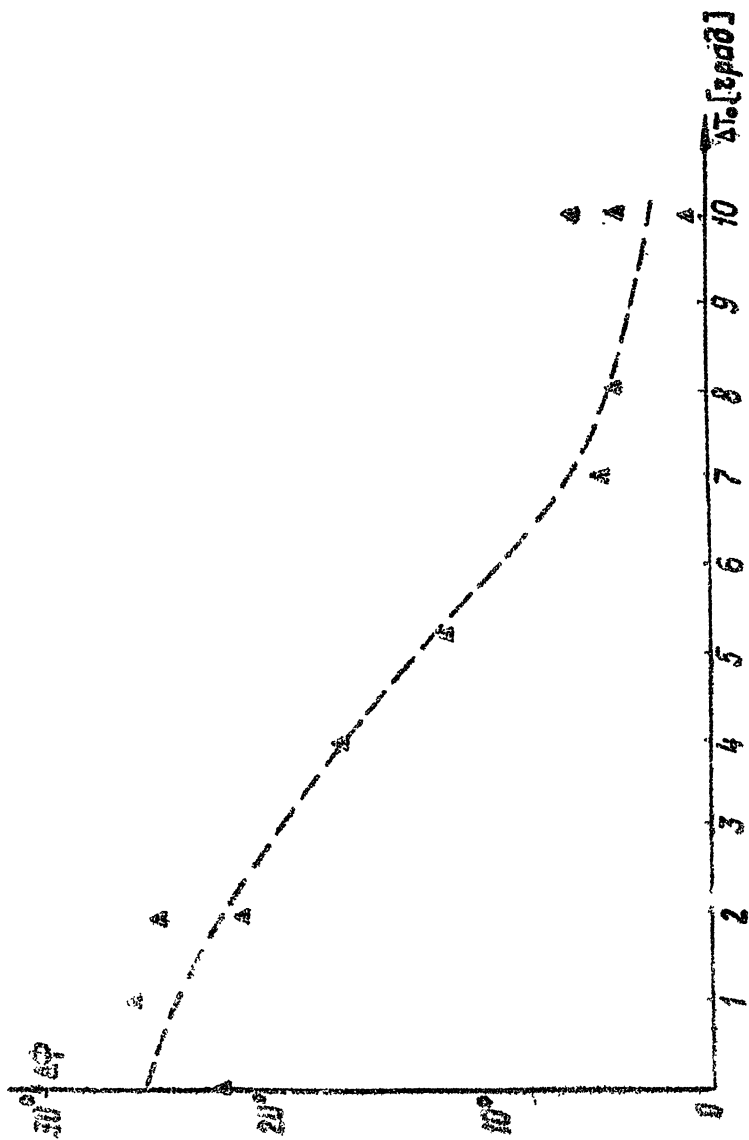
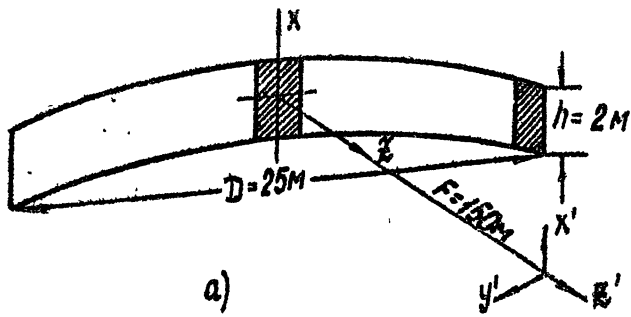
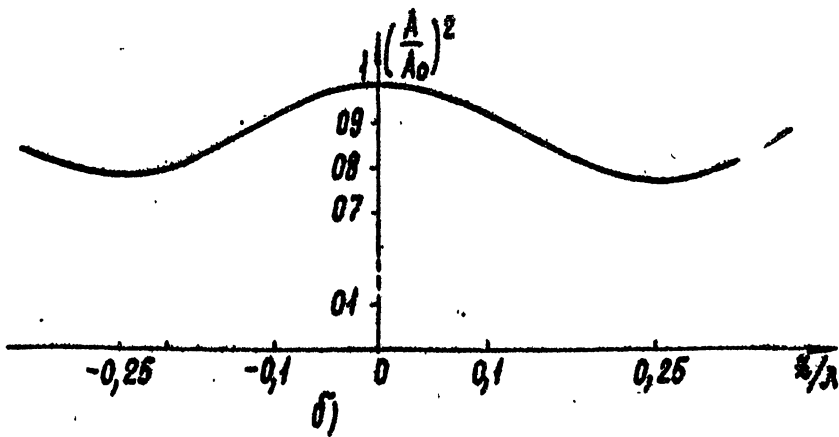


Рис. 3

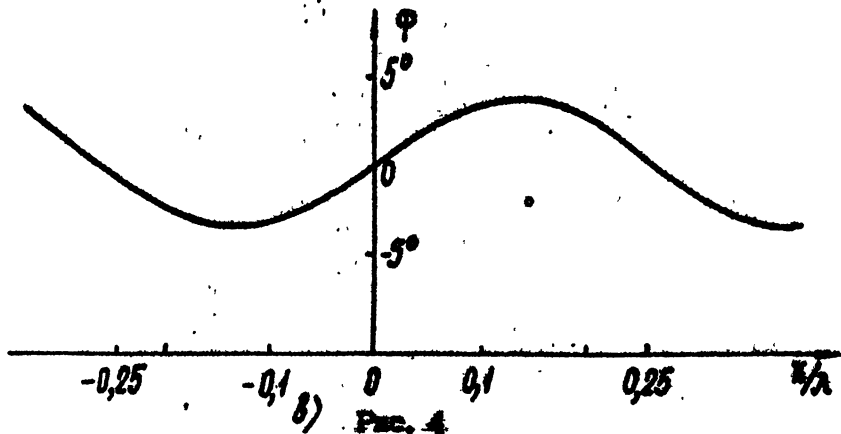




a)



b)



b)

Рис. 4

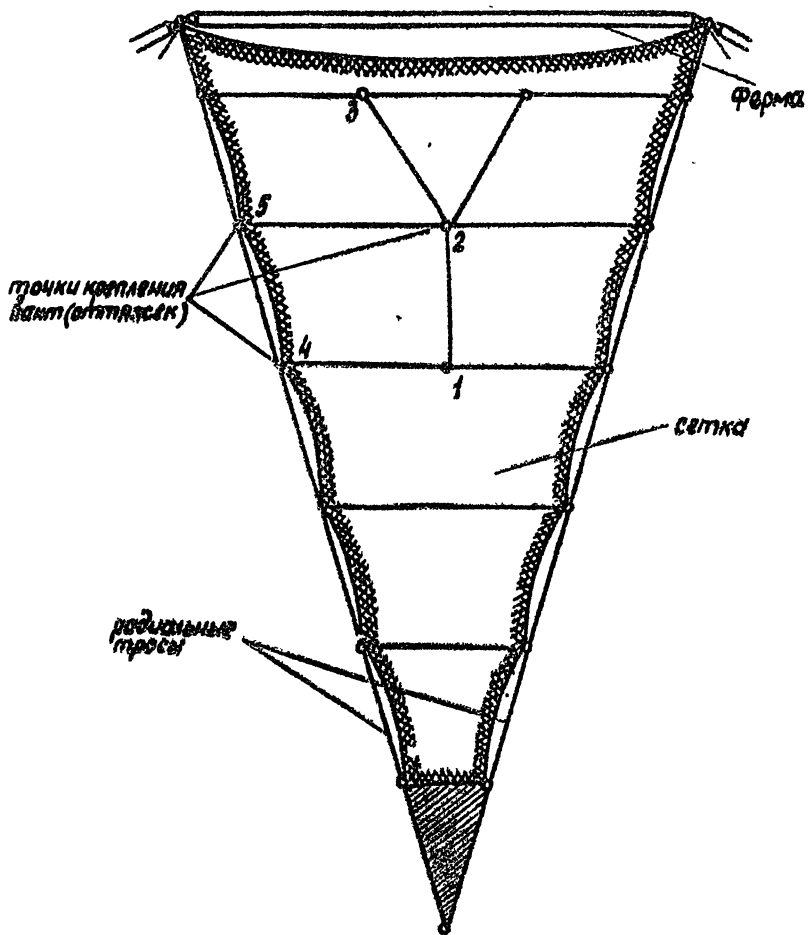


Рис. 6 а

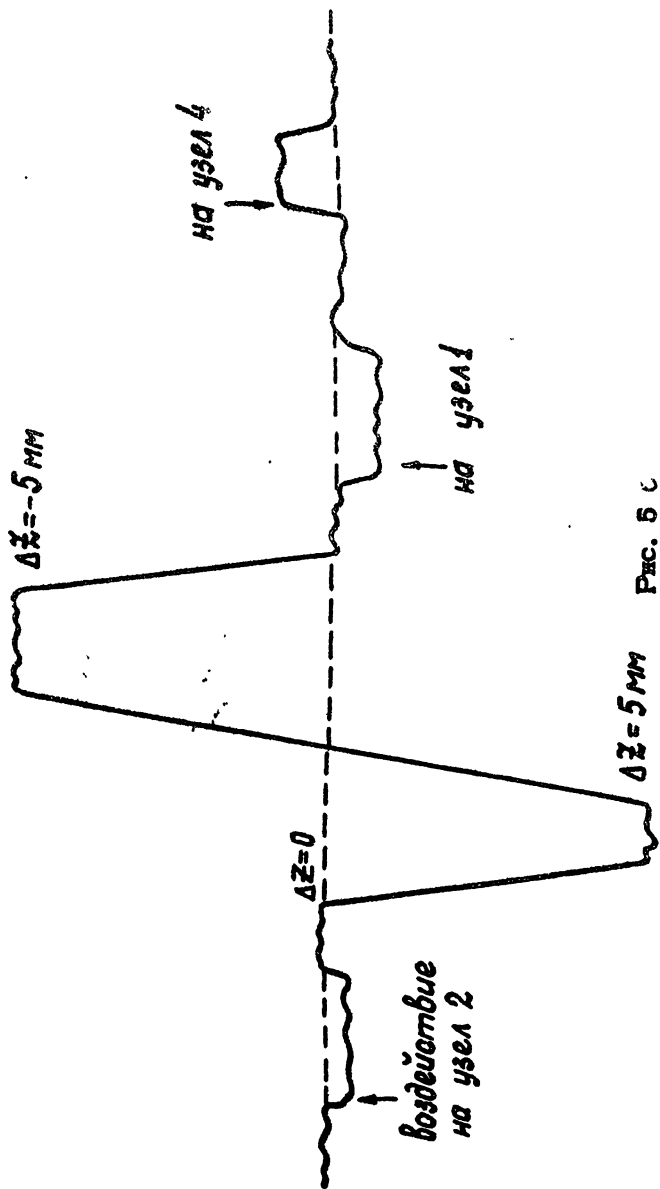
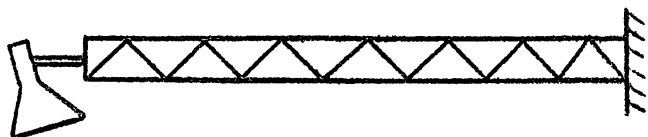


Рис. 5 с



ИСТОЧНИК  
УЗКОПЯС  
ИЗЛУЧЕНИЯ

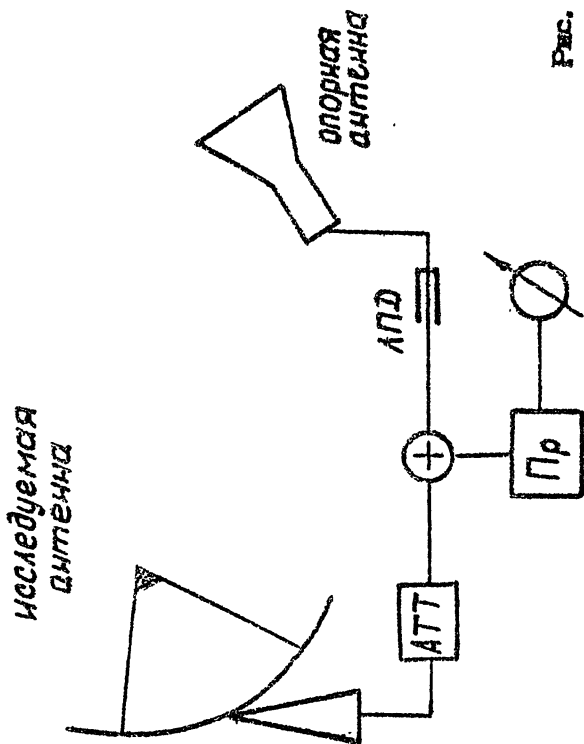


Рис. 8 а

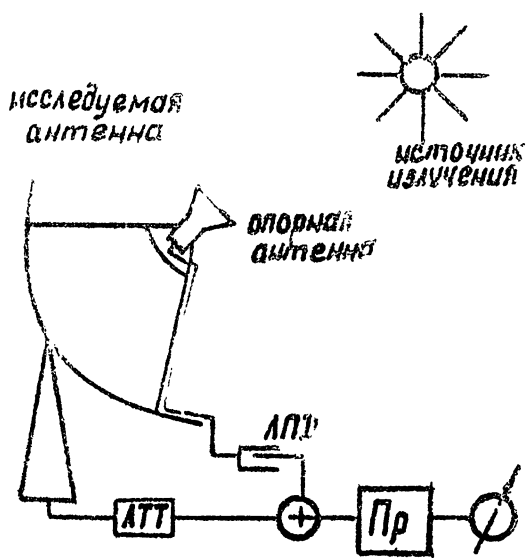


Рис. 66