

Министерство высшего и среднего специального образования  
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 279

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД НИРФИ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ АНТЕНН  
В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Антовец М.А., Бахарев Н.В., Белов Ю.И., Дивакова Е.К.,  
Калашникова Н.А., Калинин А.В., Калинина Е.Е., Корелов В.Т.,  
Коротков В.С., Красильникова Л.М., Дуванов В.Р., Миллер Е.А.,  
Моисалов И.В., Семенова Л.Р., Серкин А.Г., Тихонов Ю.Г.,  
Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Фогель А.Л., Шмонин И.А.

Горький 1989

Антонец М.А., Бахарев Н.В., Белов Ю.И., Дивакова Е.К.,  
Калашникова Н.А., Калинин А.В., Калинина Е.Е., Корелов В.Т.,  
Коротков В.С., Красильникова Л.М., Лупанов В.Р., Миллер Е.А.,  
Мосялов И.В., Семенова Л.Р., Серкин А.Г., Тихонов Ю.Г.,  
Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Фогель А.Л., Шмонин И.А.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД НИРФИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ  
АНТЕНН В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ //Препринт № 279, Горький: НИРФИ. - 1989. -  
- 67 с.

УДК 621.396.67

Дано описание разработанного и созданного в радиофизическом институте г.Горького стенда для измерения параметров антенн, где основным методом измерений является амплифазометрический в ближней зоне. Показано, что реализованная схема сканирования поля на горизонтальной плоскости над раскрывом антенны, основанная на непрерывном быстром вращении зонда и медленных поворотах антенны по азимуту, позволяет повысить оперативность и точность измерения характеристик антенн больших волновых размеров, в том числе и складных космических антенн. Приведены методика и алгоритмы измерений и обработки, реализованные в программном обеспечении управляющей ЭВМ. Представлены и проанализированы результаты исследования точностных характеристик стенда, полученное при измерении параметров симметричной антенны в диапазоне 6 см.

## I. Краткий обзор возможностей и особенностей методов измерения радиотехнических характеристик СВЧ антенн

Как известно (см., например, I...8, I4...I6) для измерения радиотехнических характеристик антенн применяются методы, использующие источники радиоизлучения, расположенные в дальней зоне антенны (метод вышки, облетный и радиоастрономический методы), а также методы измерений в ближней зоне – амплифазометрический (радиоголографический), коллиматорный, фокусировки.

Выбор методов измерения радиотехнических характеристик антенн различного назначения должен проводиться с учетом особенностей конкретных антенн и возможности реализации отдельных методов.

В ряде случаев, например, при измерении параметров космических складных антенн (9...I3), практически невозможно использование искусственного радиоисточника, установленного на вышке в дальней зоне антенны, а также применение коллиматорного метода и метода фокусировки. При этом реализация облетного метода измерений предусматривает создание специальных бортовых аппаратурных комплексов, сложных радиолокационных, оптических и телеметрических систем, что требует значительных материальных затрат и большого времени измерений. В этих условиях представляется единственно возможным использование в качестве основного амплифазометрического метода измерений параметров антенн в ближней зоне. Радиоастрономический метод измерений может использоваться как дополнительный для контроля и сравнения отдельных результатов.

Рассмотрим особенности реализации радиоастрономического и амплифазометрического методов измерения характеристик антенн.

В радиоастрономическом методе (I, I4...I6, I9) измерение параметров антенн производится при приеме радиоизлучения внеземных источников. Для измерения диаграммы направленности остронаправленных антенн возможно использование лишь нескольких дискретных радиоисточников, например, Кассиопей-А, Лебедя-А. Точность измерения

характеристик антенн радиоастрономическим методом ограничивается малостью сигналов от используемых радиоисточников. При этом могут быть определены с требуемой точностью параметры лишь главного лепестка диаграммы направленности, измерены КУ и КПД антенны. Кроме того, радиоастрономическим методом не определяются фазовые и поляризационные характеристики диаграммы направленности.

Для измерения низких уровней диаграммы направленности, а также фазовых и поляризационных характеристик антенны может быть применена модификация радиоастрономического метода – корреляционный радиоастрономический метод (15, 16). В данном методе предусматривается прием сигнала от радиоисточника на исследуемую и вспомогательную (опорную) антенны и перемножение принятых сигналов в специальном корреляционном приемнике (в настоящее время корреляционные приемники серийно не выпускаются).

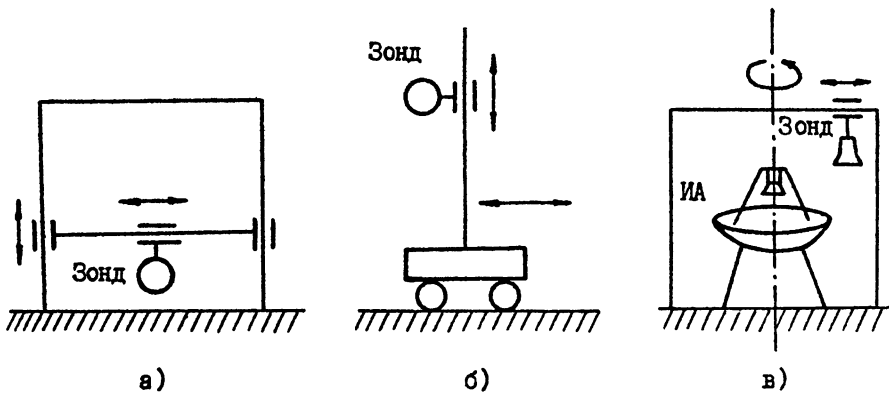
Амплифазометрический (радиоголографический) метод (1...8) позволяет определять с высокой точностью параметры как амплитудной, так и фазовой диаграмм направленности в широком (до 30...40 дБ) динамическом диапазоне на отдельных поляризациях, а также измерять коэффициент усиления антенны. Многочастотный амплифазометрический метод (28,29) позволяет, кроме того, определять влияние на измеряемые характеристики антенны окружающих предметов, в частности, элементов носителя антенны.

В амплифазометрическом методе производится измерение поля в ближней зоне исследуемой антенны с помощью вспомогательной слабо-направленной антенны-зонда. Перемещение зонда относительно исследуемой антенны должно осуществляться по заданной поверхности (поверхности сканирования).

Существуют различные кинематические схемы перемещения зонда относительно исследуемой антенны, реализующие плоскую, сферическую и цилиндрическую поверхности сканирования (см. рис. 1 и 2).

Сферическая поверхность сканирования может быть получена при вращении исследуемой антенны, установленной на опорно-поворотном устройстве с азимутально-угломестной монтировкой, по обеим координатам относительно неподвижного зонда (см. рис. 2а). Нетрудно показать (см., например, /1/), что характер заполнения сферы зависит от высоты расположения зонда относительно центра вращения исследуемой антенны. Минимальным поворотам антенны для сканирования требуемого углового сектора соответствует высота положения





Р и с. I Кинематические схемы,  
реализующие плоскую поверхность сканирования

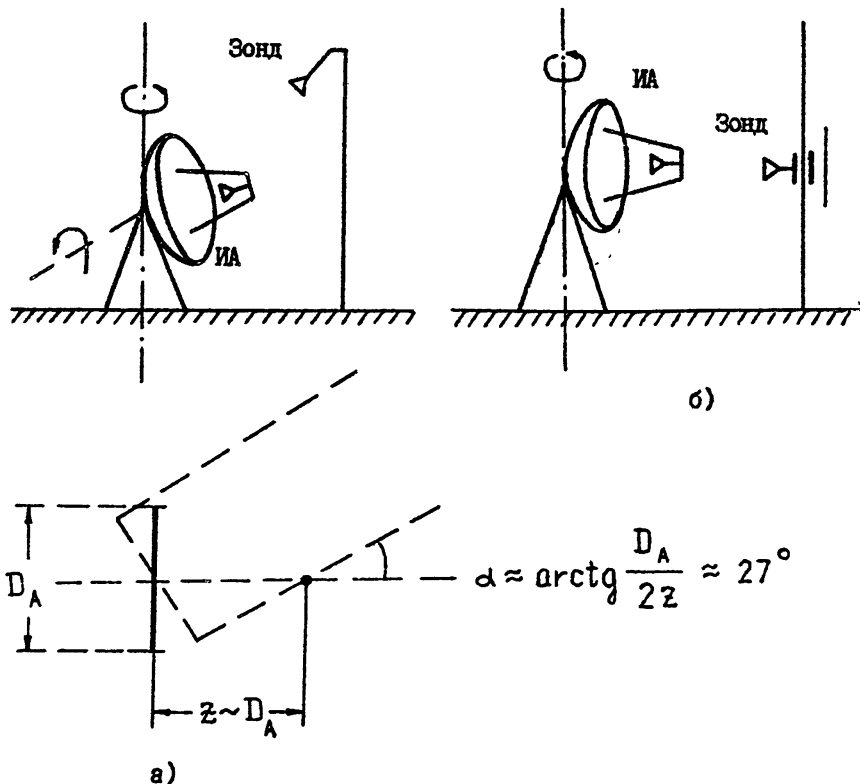
зонда  $h_z \sim 0^\circ$ . При этом, если, например, зонд установлен на расстоянии, равном линейному размеру раскрыва антенны, необходимы повороты исследуемой антенны по обеим координатам в секторе углов не менее  $\pm 30^\circ$  (см. рис. 2а).

Таким образом, реализация сферической поверхности сканирования приводит к необходимости вращения исследуемой антенны в достаточно широком секторе углов относительно "центрального" положения вблизи направления в горизонт, что не всегда возможно реализовать. Такие же ограничения возникают при реализации цилиндрической поверхности сканирования.

Плоская поверхность сканирования может быть реализована при полностью неподвижной исследуемой антенне, или при ее вращении только по азимуту. Основная трудность в этом случае, особенно при измерении характеристик крупных антенн с размером раскрыва порядка десятков метров, заключается в создании высокоточного<sup>+)</sup>  устройства перемещения зонда (сканера).

Известно несколько вариантов кинематических схем планарных сканирующих устройств, которые практически реализованы на еди-

<sup>+)</sup>  Допускаются отклонения зонда от плоскости порядка  $\frac{\lambda}{50,0} \dots \frac{\lambda}{200}$  /1,2/, что в сантиметровом диапазоне длин волн соответствует величинам 0,1...1 мм.



**Р и с. 2. Кинематические схемы, реализующие сферическую (а) и цилиндрическую (б) поверхности сканирования**

нических экземплярах специальных стенов для измерения характеристик антенн.

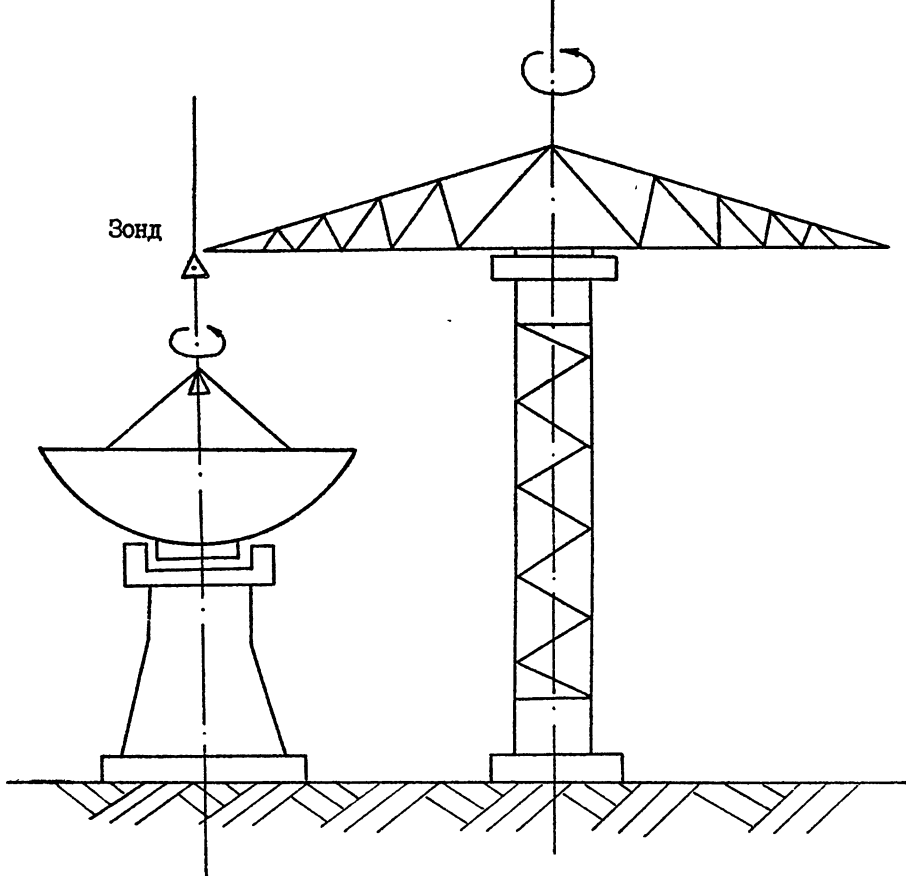
Наиболее распространенной и у нас в стране, и за рубежом /1...7/ является схема сканирования, в которой перемещение зонда складывается из двух поступательных движений так, что измерения проводятся в регулярной прямоугольной сетке отсчетов (см. рис. 1а). Так, например, в работе /7/ приведено описание автоматизированного стенов, разработанного в Национальном бюро стандартов

ША. На данном стенде используется двухкоординатное сканирующее устройство, обеспечивающее перемещение зонда в вертикальной плоскости по площади  $4,0 \times 4,5 \text{ м}^2$ . Весь стенд размещен в отдельном здании (БЭК), в котором в течение цикла измерений поддерживается неизменная температура и влажность воздуха.

Трудности создания стенда подобной конфигурации при существенном увеличении площади измерений, а особенно в случае необходимости ориентации оси антенны в зенит, очевидны и связаны в первую очередь с появлением разного рода деформаций сканирующего устройства, приводящих к искажению траектории движения зонда и, соответственно, к возрастанию погрешности измерений.

Модификация планарной схемы сканирования была предложена в работах /6,26,27/, где рассмотрена методика измерений и обработки на стенде Калифорнийского технологического института для измерения характеристик космических антенн. В данной схеме зонд перемещается по линейной направляющей в горизонтальной плоскости над раскрытом исследуемой антенны, которая при измерениях ориентируется в зенит и совершает вращение по азимуту (см. рис. 1в). Рассматриваемый стенд также размещен в БЭК, направляющая устройства перемещения зонда смонтирована на потолке здания. Управление положением зонда и контроль точности перемещения осуществляется с помощью специальной оптической системы. Максимальный интервал перемещения зонда, определяющий радиус области сканирования, составляет 5 м. В работе /8/ приведены результаты измерения на данном стенде радиотехнических характеристик складной антенны космического корабля "Галилей" с диаметром зеркала 4,8 м.

Для измерения амплифазометрическим методом характеристик антенны, установленных с возможностью вращения вокруг вертикальной оси и ориентированных в зенит, в НИРФИ было предложено сканирующее устройство /20/, осуществляющее перемещение зонда по дуге окружности в горизонтальной плоскости. Это сканирующее устройство установлено на радиоастрономической станции (РАС) НИРФИ "Старая Пустынь", где на базе 7-метрового радиотелескопа создан стенд для отработки методов и методик автоматизированных измерений характеристик антенн. Схема сканирования поля в ближней зоне антенны на стенде НИРФИ, основанная на вращении зонда и исследуемой антенны (см. рис. 3), позволяет повысить оперативность и точность измерения характеристик антенн больших волновых размеров,



Р и с . 3

в том числе и складных космических антенн. Конструкция стенда НИРФИ позволяет проводить испытания антенн с диаметром раскрыва до 10...12 метров.

Состав стенда НИРФИ и его возможности рассмотрены в следующих разделах.

## 2. Общее описание стенда НИРФИ для измерения характеристик антенн

На стенде НИРФИ предусмотрено проведение измерений характеристик антенны двумя независимыми методами – амплифазометрическим в ближней зоне и радиоастрономическим. При этом амплифазометрический метод является основным, а радиоастрономический используется для контроля и сравнения результатов.

Внешний вид стенда показан на рис. 4 и 5. Стенд состоит из опорно-поворотного устройства с исследуемой антенной, устройства перемещения измерительной антенны (сканера), оптической системы контроля положения измерительной антенны, СВЧ тракта и управляющего измерительно-вычислительного комплекса. Ниже приводится описание основных частей стенда /И8, 20...25/.

Исследуемой антенной на стенде является осесимметричная зеркальная параболическая антенны (РТН-7), установленная на опорно-поворотном устройстве (ОПУ) с азимутальной и угломестной осями вращения. Облучатель антенны располагается в фокусе зеркала и имеет возможность перемещения как вдоль оси, так и в перпендикулярной плоскости (для юстировки). Управление ОПУ антенны производится с помощью специально разработанной цифровой системы /22/. При вспомогательных операциях и отладочных работах используется также штатная аналоговая система управления радиотелескопом.

Сканирующее устройство представляет собой симметричную Т-образную конструкцию, верхняя часть которой – двухконсольная вантово-стержневая стрела – смонтирована на опорно-поворотном устройстве с возможностью вращения вокруг вертикальной оси. Основные габаритные размеры сканера составляют:

- общая высота – 15,5 метров;
- высота остова башни, определяющая высоту расположения стрелы – 12 метров;
- размер поперечного сечения башни –  $2 \times 2 \text{ м}^2$ ;
- односторонний вылет стрелы, определяющий максимальный радиус сканирования – 7,5 метров.

На конце стрелы сканера устанавливается измерительная антенна (зонд) таким образом, чтобы ее фазовый центр проходил при вращении стрелы над азимутальной осью ОПУ исследуемой антенны. В верх-

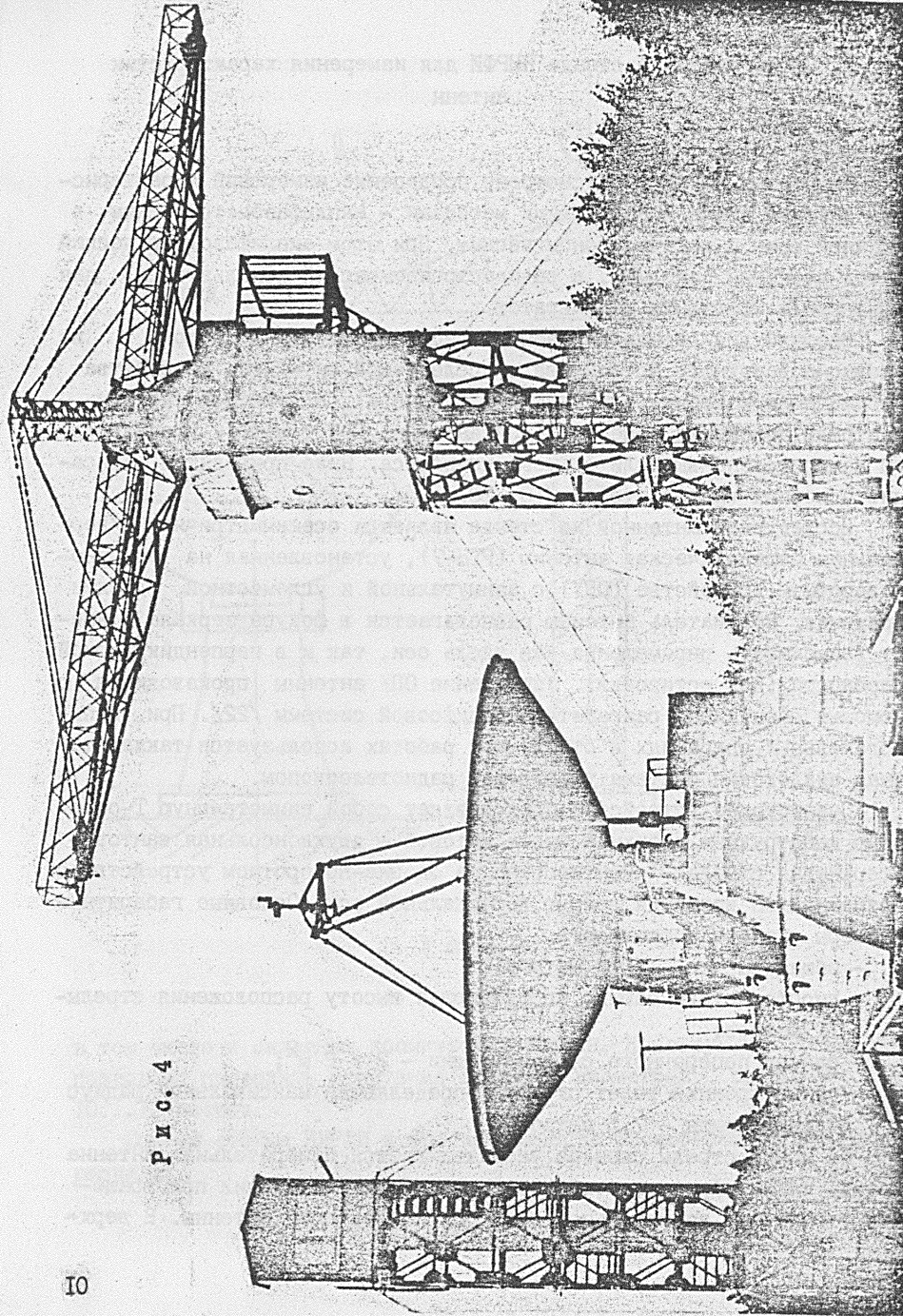
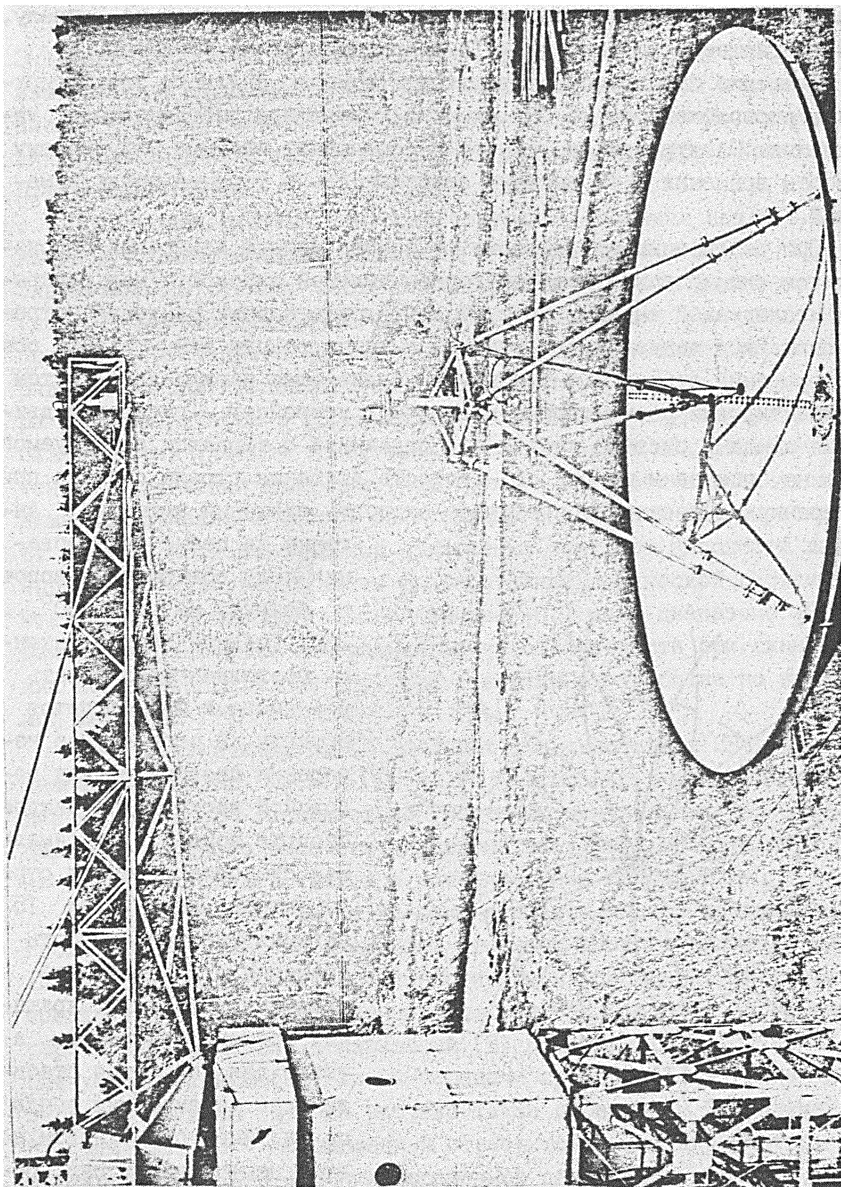


Рис. 4



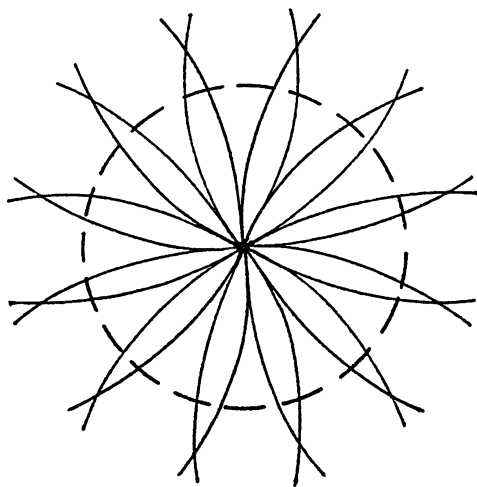
Р и о. 5

ней части сканера на оси вращения стрелы установлены последовательно низкочастотный токоотъемник для передачи сигналов на стрелу, СВЧ вращающееся соединение и I4-разрядный датчик угол-код.

Вращение стрелы осуществляется с помощью силового электропривода, расположенного на ОПУ сканера и имеющего дистанционное управление. Электропривод сканера обеспечивает плавную регулировку частоты вращения и ее высокую стабильность в течение цикла измерений.

При реализации амплифазометрического метода измерений производится сканирование поля на горизонтальной плоскости над раскрывом исследуемой антенны за счет двух вращательных движений — стрелы сканера с зондом и исследуемой антенны вокруг азимутальной оси. Оси вращения стрелы и антенны устанавливаются параллельно путем горизонтировки обоих опорно-поворотных устройств. Траектории движения зонда в системе координат, связанной с зеркалом исследуемой антенны, показаны на рис. 6. Скорость вращения стрелы сканера при измерениях существенно превышает скорость вращения антенны. Ан-

тенна за сеанс сканирования поля совершает поворот по азимуту на угол  $180^{\circ}$ ...  $360^{\circ}$  (полный оборот антенны позволяет реализовать равномерный шаг отсчетов по углу. В этом случае измерения проводятся над половиной раскрыва на каждом обороте зонда). Максимальная скорость вращения стрелы сканера составляет 15 об/мин. Высокая скорость вращения стрелы сканера предусмотрена для сокращения времени измерений, а также для повышения стабильности перемещения зонда по заданной поверхности за счет центробежных сил, препятствующих развитию попе-



Р и с . 6



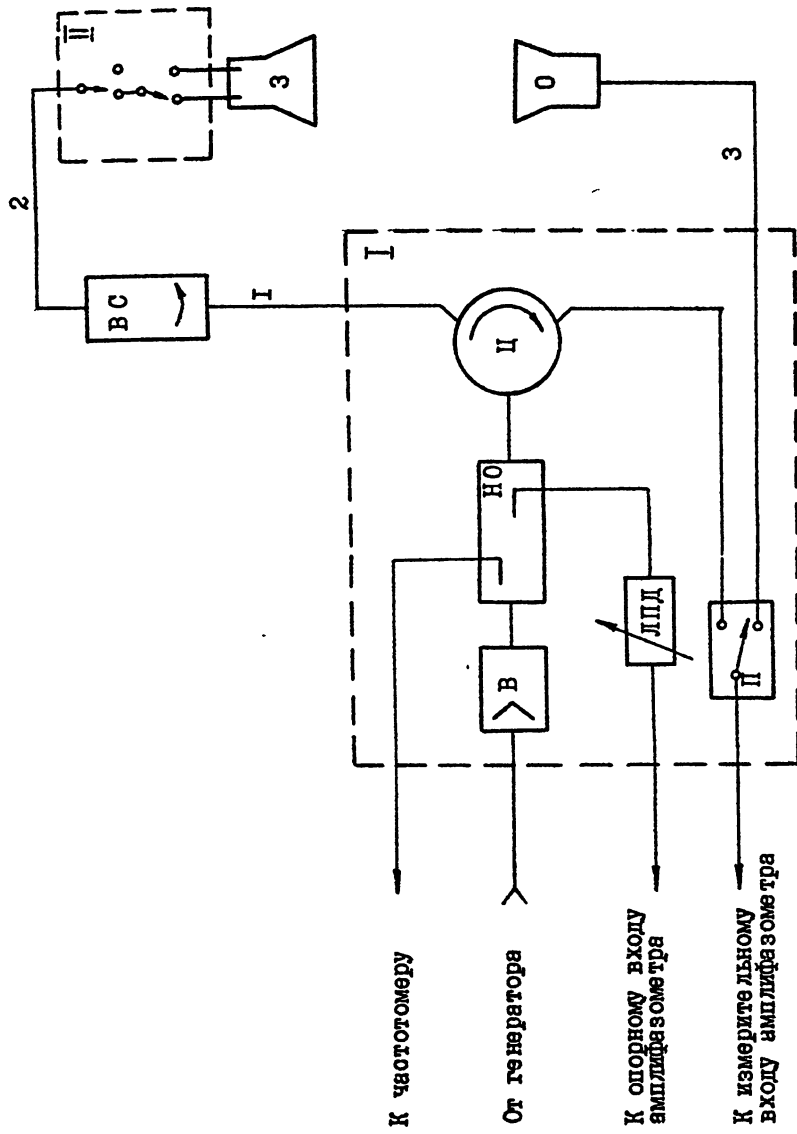
речных колебаний.

При измерениях зонд работает в режиме излучения СВЧ сигнала. Значения амплитуды и фазы сигнала, принятого исследуемой антенной, измеряются и запоминаются в ЭВМ. Одновременно в ЭВМ поступают данные об угловом положении стрелы сканера и антенны. По окончании цикла измерений производится расчет диаграммы направленности исследуемой антенны.

Оптическая система контроля текущего положения зонда в вертикальной плоскости была предложена и разработана в НИРФИ /21/ и опробована на стенде. Система включает в себя источник излучения (лазер), установленный на отдельно стоящей вышке (см. рис. 4), и приемник оптического излучения, расположенный на стреле сканера рядом с зондом. С помощью специальной оптической схемы луч лазера разворачивается в горизонтальной плоскости в угловой сектор, охватывающий участок траектории вращения зонда над раскрывом антенны. Оптический приемник, конструкция которого позволяет принимать излучение с любого азимутального направления, вырабатывает сигнал, пропорциональный отклонению зонда от плоскости лазерного луча. Чувствительность разработанной оптической системы к отклонениям зонда составляет порядка  $\pm 0,1$  мм в диапазоне  $\pm 20$  мм. Измеренные значения отклонений зонда от плоскости при сканировании поля антенны могут быть использованы в обработке по известной методике /1,2/.

СВЧ тракт стенда НИРФИ содержит два однотипных СВЧ тракта на диапазоны частот  $f_1 = 5$  ГГц и  $f_2 = 1,66$  ГГц с полосой пропускания не менее  $\pm 3\%$  относительно указанных центральных частот. При переходе с одного рабочего диапазона на другой производится замена отдельных блоков тракта и измерительных приборов.

Блок-схема СВЧ тракта на один диапазон частот показана на Рис. 7. Он состоит из следующих основных блоков: делителя мощности (I), расположенного в технологическом помещении; вращающегося соединения (BC), установленного на оси ОПУ сканера; блока модулятора и переключателя поляризаций (П) на зонде (З); облучателя исследуемой антенны (О); линий передачи сканера (1) и (2) и линий передачи антенны (3). На рисунке также обозначены СВЧ элементы: В - вентиль, НО - направленный ответвитель, Ц - циркулятор, П - переключатель, ЛПД - линия переменной длины. Все элементы СВЧ тракта, за исключением вентилья, циркулятора и линии переменной



Р и с. 7. Блок-схема СВЧ тракта стэнда Н И Р Ф И

длины, разработаны и изготовлены в НИРФИ.

В качестве зонда на стенде используется рупорная антенна с диаметром апертуры  $0,86 \lambda$ , углом при вершине рупора  $12^\circ$  и КНД  $\sim 9,4$  дБ. Зонд выполнен в двух вариантах – для работы на двух ортогональных линейных и на двух ортогональных круговых поляризациях. При переходе от режима работы с линейными поляризациями на режим работы с круговыми поляризациями производится замена зондов. Предусмотрена возможность совместной установки на конце стрелы зондов на обе рабочие частоты и прокладка по сканеру двух параллельных кабельных трасс.

Вращающиеся соединения выполнены как по отдельности на каждую рабочую частоту, так и совмещенное, позволяющее проводить измерения одновременно на обеих частотах. Особенность разработанной конструкции вращающегося соединения состоит в том, что помимо разделения вращающейся и неподвижной частей СВЧ тракта в ней предусмотрена передача вращения датчику углового положения сканера.

В качестве линий передачи СВЧ сигнала на стенде используется полужесткий фазостабильный коаксиальный кабель РК50-7-58С, имеющий потери  $\alpha_1 \sim 0,32$  дБ/м на частоте 5 ГГц и  $\alpha_2 \sim 0,15$  дБ/м на частоте 1,66 ГГц. Суммарная протяженность линий передачи сканера (от делителя мощности до зонда) составляет около 40 метров, протяженность тракта антенны от облучателя до амплифазометра – 30 метров.

Необходимо отметить, что в разработанной схеме измерений, в отличие от рассмотренных в предыдущем параграфе схем с поступательным перемещением зонда, СВЧ тракт сканера имеет постоянную длину и фиксированное положение (не изгибается), что обеспечивает минимальные искажения при передаче сигнала.

При общей длине кабельных трасс стенда в 70 метров возможно появление флуктуаций электрической длины трактов из-за изменений внешней температуры, приводящих к ошибкам измерения распределения поля антенны. Поэтому на участке тракта "делитель мощности – зонд" предусмотрен оперативный контроль флуктуаций электрической длины, для чего в схему введены модулятор, циркулятор (Ц) и переключатель (П). Модулятор, также как и переключатель поляризаций, выполнен на рiп-диодах, помещен в герметичный корпус непосредственно на зонде и имеет дистанционное управление. При измерении электрической длины тракта производится включение модулятора и перевод амплифазометра в режим работы по модулированному сигналу.

Управляющий измерительно-вычислительный комплекс расположен в технологическом помещении стенда. Блок-схема комплекса показана на рис. 8. Внешний вид аппаратуры комплекса показан на рис. 9.

Комплекс выполняет следующие функции:

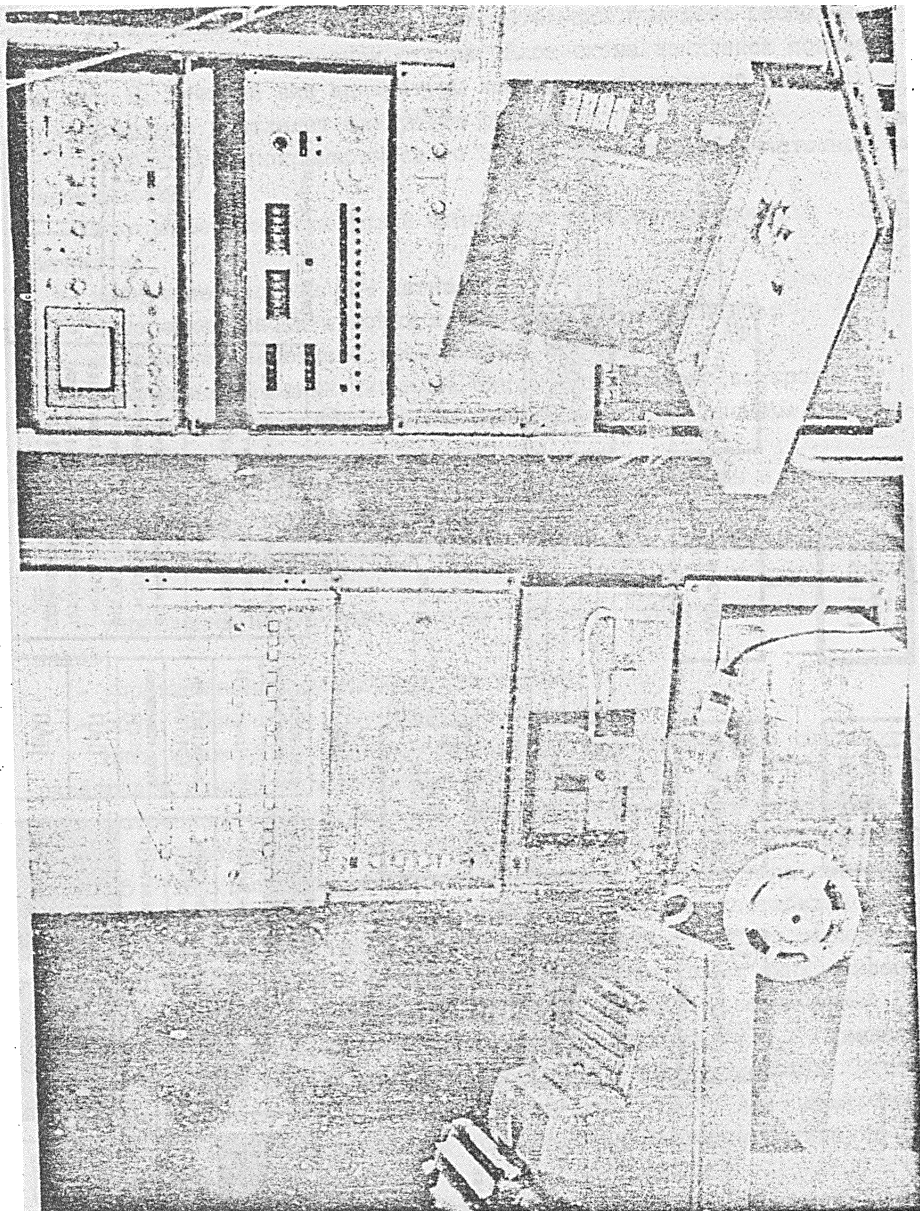
- генерацию монохроматического СВЧ сигнала высокой частотной стабильности;
- измерение разности фаз и отношения уровней когерентных СВЧ сигналов;
- измерение частоты СВЧ сигнала;
- измерение слабых шумовых и синусоидальных сигналов;
- измерение декретного времени;
- измерение выходных сигналов систем оптического контроля;
- измерение угловых координат положения стрелы сканера и скорости ее вращения;
- управление опорно-поворотным устройством антенны и измерение текущих угловых координат ее положения;
- управление измерителем разности фаз и отношений уровней сигналов;
- управление измерителем слабых шумовых и синусоидальных сигналов;
- управление коммутаторами СВЧ тракта;
- сбор, обработку и отображение данных.

Ниже приводятся основные характеристики приборов и систем управляющего измерительного комплекса.

Источником СВЧ сигнала при амплифазометрических измерениях служит генератор Г4-8I (в диапазоне 5 ГГц), либо Г4-78 (в диапазоне 1,66 ГГц). Выходная мощность генераторов данного типа составляет примерно 10 мВт, кратковременная относительная нестабильность частоты порядка  $10^{-4}$ . Для обеспечения необходимой точности измерения фазы поля антенны в ближней зоне применена схема синхронизации частоты. При этом использованы генератор спорной частоты типа Г4-148 (относительная нестабильность частоты порядка  $10^{-7}$ , диапазон частот 20...650 МГц) и синхронизатор Ч5-19. Результирующая стабильность частоты источника сигнала не хуже  $\pm 10^{-6}$ . Для измерения частоты СВЧ сигналов на стенде используется частотомер типа ЧЗ-38 с блоком ЯЗЧ-42.

При сканировании распределения поля антенны в ближней зоне используется измеритель разности фаз и отношений уровней сигналов





(амплифазометр) типа ФК2-24 в диапазоне 5 ГГц (ФК2-22 в диапазоне 1,66 ГГц). Погрешность измерений данного класса амплифазометров составляет не более  $\pm 3^{\circ} \dots 7,5$  по фазе и  $\pm 0,2 \dots 3,2$  дБ по амплитуде в диапазоне уровней сигналов  $10^{-6} \dots 10^{-12}$  Вт. Приборы содержат специальные блоки калибровок для контроля стабильности коэффициентов усиления; предусмотрен также режим работы по модулированному сигналу.

Измерения выходного сигнала приемника оптического излучения производятся частотомером ЧЗ-38 с блоком ЯЗЧ-45.

При радиоастрономических измерениях используются радиометры ПК7-9 и ПК7-11, доработанные с целью автоматизации управления набором электромагнитных реле, и цифровой вольтметр В7-18 для аналого-цифрового преобразования выходного сигнала радиометра. Флуктуационная чувствительность радиометров с дополнительным малошумящим СВЧ усилителем на входе составляет  $\sim 0,5$  К.

Измерение декретного времени и синхронизацию работы комплекса при радиоастрономических наблюдениях осуществляет синхрометр Ч7-15.

Для измерения и индикации данных об угловом положении зонда был разработан специальный блок, который преобразует выходной сигнал I4-разрядного датчика угол-код ППФЭ-I4В, установленного на ОПУ сканера, и определяет скорость вращения зонда. Блок содержит пульт управления для ввода параметров сканирования поля антенны (углового сектора и дискрета измерений), в соответствии с которым вырабатываются метки, синхронизирующие работу комплекса при амплифазометрических измерениях.

Для управления ОПУ антенны и измерения ее угловых координат была разработана специальная система автоматического управления (САУ) /22/. САУ предназначена, в основном, для автоматизации радиоастрономических измерений, когда требуются сложные манипуляции угловым положением антенны по обеим координатам. В амплифазометрических измерениях, как было сказано выше, антенна ориентируется в зенит и вращается по азимуту. В состав САУ входят: I4-разрядные датчики угол-код ППФЭ-I4В, установленные на ОПУ антенны; ЭВМ "Электроника ДЗ-28"; программатор 304; программируемые источники питания Б6-I в качестве цифро-аналоговых преобразователей; пульт управления, с которого задается режим работы САУ. САУ обеспечивает движение антенны по обеим координатам и индикацию текущих значе-

ний координат как по командам с пульта управления ("ручной режим"), так и по командам от ЭВМ комплекса. Темп управления, определяемый быстродействием ЭВМ САУ, составляет 3 Гц, при этом погрешность сопровождения антенной заданной траектории при малых скоростях движения (в радиоастрономических измерениях) не превышает двух угловых минут.

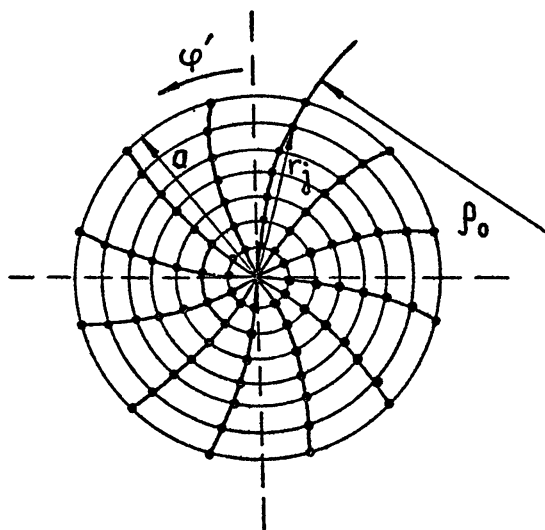
Для управления режимами работы приборов и систем стенда, а также для сбора, обработки и отображения данных используется ЭВМ ТУ-901А. Основные характеристики ТУ-901А следующие: объем ОЗУ 16 К 16-разрядных слов; время выполнения "коротких" команд - 4 мкс; имеется блок расширенной арифметики; язык программирования - ФОРТРАН-2 и АССЕМБЛЕР. Штатные периферийные устройства: ЭПМ "Консул-254", фотосчитывающее устройство FS-150I и ленточный перфоратор ПЛ-150М. На стенде НИРФИ к ТУ-901А подключены дополнительные периферийные устройства - алфавитно-цифровой дисплей РИН-609 и блок внешней памяти "Электроника-ОЗУ 64К" на 64 килослов. Для подключения к ТУ-901А приборов и систем комплекса использованы в основном стандартные интерфейсные платы, разработанные НПО "Кварц": регистры 32-битные входные 524, регистры 32-битные выходные 522, регистры 16-битные дуплексные 523, регистры 16-битные релейные 521.

Неотъемлемой и важной частью управляющего измерительного комплекса является его программное обеспечение (ПО). Оно разработано на базе системного перфоленточного обеспечения ТУ-901А. Разработка ПО заключалась, с одной стороны, в создании программ-драйверов, обслуживающих внешние устройства и включенных в операционную систему, и создании тестовых программ проверки работы приборов и систем стенда /23/. С другой стороны, были разработаны управляющие и обрабатывающие программы, позволяющие полностью автоматизировать сбор и обработку данных при измерении характеристик антенны /24,25/. Программы управления и обработки предусматривают взаимодействие ТУ-901А со всеми вышеперечисленными приборами и системами стенда НИРФИ в процессе выполнения следующих задач:

- определение по внеземным источникам радиоизлучения коэффициента усиления, коэффициента полезного действия и отдельных сечений диаграммы направленности исследуемой антенны по разработанным в НИРФИ алгоритмам /19/;

- проведение планарных измерений поля исследуемой антенны в ближней зоне и последующего восстановления параметров ее диаграм-





Р и с. 10

мы направленности по методике, изложенной в третьем разделе данной работы;

- выполнение контрольных измерений показаний аппаратуры стенда и статистического анализа данных по известным (см., например, /33/) алгоритмам с целью определения количественных значений случайных составляющих ошибок измерений и выявления возможных корреляционных связей погрешностей и их спектров.

### 3. Методика измерения и обработки данных поля в ближней зоне антенны

Схема сканирования поля в ближней зоне антенны на стенде НИРФИ имеет особенности, существенные для выработки методики измерений и обработки. Они состоят, в основном, в том, что:

- измерения проводятся в узлах "квазирадиальной" сетки, образованной из пересечений дуг и колец (см. рис. 10);
- время измерений разбивается на периодически повторяющиеся интервалы "рабочей зоны", когда зонд находится над раскрывом исследуемой антенны.

Для данной схемы сканирования параметры, определяющие дискрет и размер области измерений, задавались с учетом известных результатов исследования методических погрешностей амплифазометрического метода, приведенных в работах /1...4,6/. Кроме того, были

определены точностные характеристики используемых на стенде приборов и устройств (см. раздел 5 данной работы), и на основании полученных данных выбирались режимы измерения поля антенны. В частности, рассматриваемый вначале режим непрерывного вращения исследуемой антенны оказался неприемлем из-за недостаточной точности сопровождения антенной заданной траектории на больших (порядка 10...60 угл. мин/сек) скоростях. Поэтому на стенде НИРФИ было реализовано дискретное перемещение антенны, так называемый старт-стопный режим. Было также выявлено, что увеличение скорости вращения стрелы сканера приводит к возрастанию дисперсии измеряемых значений, вследствие чего сканирование поля антенны выполнялось при сравнительно небольших скоростях – порядка 2...6 об/мин. Результаты исследования статистических свойств измеряемых сигналов позволили определить оптимальный режим калибровок и обосновать проведение калибровки по строке взамен предварительно предусмотренной калибровки по центральной точке.

По разработанным с учетом названных обстоятельств алгоритмам измерения и обработки данных составлялись технические задания на программное обеспечение амплифазометрических измерений. Для исследования возможностей определения характеристик испытуемой антенны в различных режимах измерений и обработки программное обеспечение сделано достаточно "гибким". Параметры, вводимые оператором с пульта терминала в диалоговом режиме работы программ, определяют различные режимы измерений, калибровки и обработки данных.

Ниже рассмотрены возможности методики измерения и обработки данных на стенде НИРФИ /17,18/, реализованные в программном обеспечении амплифазометрических измерений.

### 3.1. Выбор параметров измерений

Процесс измерения поля антенны в ближней зоне на стенде НИРФИ полностью автоматизирован. При подготовке к измерениям производится ввод и запуск управляющей программы, определение параметров ее работы. Параметры управляющей программы по своему назначению могут быть условно разделены на несколько групп.

а) Группу параметров, формирующих сетку сканирования поля антенны, составляют: начальный азимут  $A_{з\text{ ант}}$ , направление и дискрет вращения антенны  $\Delta A_{з\text{ ант}}$ , число строк  $L$ , начало рабочей зоны, конец рабочей зоны, дискрет сканирования  $\Delta_c$ .

Параметр "начальный азимут" определяет значение азимутальной координаты антенны для первой измеряемой строки; он используется при обработке для привязки сетки сканирования к системе координат зеркала антенны.

Параметр "конец рабочей зоны" задается равным предварительно измеренному значению угловой координаты сканера, соответствующему положению зонда над осью вращения антенны. Разность конца и начала рабочей зоны (размер рабочей зоны) определяет радиус области измерения поля антенны:

$$R_{\text{изм}} = a = 2\rho_0 \sin \frac{\alpha_{P.3} \delta_c}{2},$$

где  $\alpha_{P.3}$  - размер рабочей зоны в дискретах  $\delta_c$  датчика угла поворота сканера,  $\rho_0$  - радиус вращения зонда. Выбор радиуса области измерений связан с угловым сектором  $\Delta\theta$  восстановления диаграммы направленности соотношением /1,2/

$$R_{\text{изм}} \approx \frac{D_a}{2} + \Delta z \operatorname{tg} \Delta\theta,$$

где  $D_a$  - диаметр апертуры антенны,  $\Delta z$  - расстояние от плоскости апертуры до плоскости измерений. На стенде НИРФИ для определения диаграммы направленности антенны на длине волны  $\lambda = 6$  см в угловом секторе  $\pm 3^\circ \dots 5^\circ$  требуется проведение измерений в области с радиусом порядка четырех метров.

Параметр "дискрет сканирования"  $\Delta_c$  определяет шаг между измерениями в направлении радиуса апертуры антенны  $\Delta r = 2\rho_0 \sin \frac{\Delta_c \delta_c}{2}$ . Шаг в перпендикулярном направлении  $\Delta x_\varphi$  задается параметром  $\Delta A_{3\text{ант}}$ . Для внешнего круга области сканирования  $\Delta x_\varphi = 2a \sin (\Delta A_{3\text{ант}}/2)$ . В рассматриваемом случае восстановления диаграммы направленности остронаправленных антенн в угловом секторе  $\pm 1 \dots \pm 3$  боковых лепестка условие выбора дискрета измерений имеет вид /1/

$$\frac{\lambda}{2} \lesssim \Delta x \lesssim (0,2 \dots 0,4) \lambda / \sin \theta_0 = (4 \dots 8) \lambda.$$

Для обоснования выбора шага измерений на стенде НИРФИ проводились

модельные расчеты, а также экспериментальные исследования погрешности восстановления параметров диаграммы направленности антенны при различных дискретах перемещения зонда и антенны. Учитывались также особенности исследуемой антенны и схемы сканирования, а именно то, что

- измеряемое распределение поля антенны близко к осесимметричному;

- продолжительность измерения поля антенны зависит лишь от числа строк и не связана с количеством замеров в строке.

В соответствии с названными обстоятельствами параметры  $\Delta_c$  и  $\Delta A_{3 \text{ ант}}$  выбирались при измерениях таким образом, чтобы реализовать шаг по радиусу порядка  $\Delta r \sim (0,5 \dots 2,0) \cdot \lambda$ , а по углу  $\Delta \alpha_{\varphi} \geq 3\lambda$ . При этом, так как в обработке используется алгоритм одномерного ВПФ, необходимо, чтобы отношение  $\frac{2\pi}{\Delta A_{3 \text{ ант}}}$  являлось целой степенью двойки.

Методика измерений предусматривает возможность изменения числа строк независимо от заданного дискрета вращения антенны, например, для реализации калибровки по сечению поля антенны (строке). В этом случае траектории первой и последней измеренных строк в системе координат зеркала антенны должны быть тождественны. Последняя строка используется для коррекции полученных данных и в вычислении характеристик антенны не участвует.

б) Параметры, связанные с поляризацией зонда, определяют тип поляризации и режим ее переключения. Измерения могут проводиться как с зондом, излучающим сигнал круговой поляризации, так и с зондом, работающим на линейных ортогональных поляризациях. В случае измерения поля антенны на двух ортогональных поляризациях задается режим их переключения. Предусмотрено два режима переключений: с последовательным измерением каждой строки на обеих поляризациях, либо с измерением распределения поля на одной поляризации, затем на ортогональной.

в) Параметр "дискрет калибровок" определяет периодичность (через сколько строк) проведения калибровок аппаратуры. Возможна реализация двух типов калибровок аппаратуры - калибровки амплитазометра (паспортный режим работы прибора) и калибровки электрических длин СВЧ трактов (по модулированному сигналу).

г) Параметр "Вид управления антенной" определяет способ (ручной или автоматический) управления движением исследуемой антенны.



- при установлении антенны в заданное положение производится опрос координат зонда и сравнение их с заданным значением "начала рабочей зоны", с момента входа зонда в рабочую зону производится измерение показаний амплифазометра в точках с заданным дискретом;

- при выходе зонда из рабочей зоны могут выполняться (с заданной периодичностью) калибровки аппаратуры, после чего на дисплей выдается сообщение об окончании измерения очередного сечения и происходит переход к измерению следующего.

При скорости вращения сканера 2...6 об/мин и числе строк от 32 до 128 время измерения распределения поля антенны составляет от 5 до 40 минут.

Методикой измерений предусмотрена возможность останова и повторного запуска управляющей программы с сечения произвольного номера в случае возникновения сбойных ситуаций.

По окончании измерения заданного числа строк программой производится предварительный анализ полученных данных. Проверяется соответствие координат зонда расчетным, определяются ошибки установки антенны в заданные положения. Анализируются также измеренные значения фазы сигнала. В случае обнаружения кода, соответствующего переходному состоянию амплифазометра<sup>1)</sup>, данному значению фазы присваивается величина  $+150^{\circ}$ , знак определяется по соседним точкам. Предусмотрен вывод измеренных значений любого сечения на печать. Для оперативного контроля возможен также вывод данных на печать в символьном виде. На рис. II показан образец протокола измерений с выводом данных в символьном виде.

### 3.3. Обработка данных и вычисление параметров диаграммы направленности

Обработка измеренных значений амплитуды и фазы поля антенны начинается с проведения коррекций методами исключения линейного тренда. Выполняются преобразования:

а) по калибровкам амплифазометра

---

<sup>1)</sup> Фазовые детекторы амплифазометров ФК2-20...ФК2-26 имеют "мертвую зону" при значениях измеряемой разности фаз  $|\Delta\varphi| \sim 150^{\circ}$  при этом прибором выдается на ЭВМ сигнал "фаза неверна".

$$A_{jl} = A_{jl}^{\text{изм}} \frac{A_1^{\text{ср}}}{A_{i-1}^{\text{ср}} + (A_i^{\text{ср}} - A_{i-1}^{\text{ср}}) D_i},$$

$$\varphi_{jl} = \varphi_{jl}^{\text{изм}} - (\varphi_{i-1}^{\text{ср}} - \varphi_1^{\text{ср}}) - (\varphi_i^{\text{ср}} - \varphi_{i-1}^{\text{ср}}) D_i,$$

где  $l$  - номер "строки",  $j$  - номер точки в строке,  $A_i^{\text{ср}}$ ,  $\varphi_i^{\text{ср}}$  массив калибровочных замеров, индекс  $(i-1)$  относится к ближайшей предшествующей измерению строки калибровке, индекс  $i$  соответствует ближайшей следующей за измерением строки калибровке,

$$D_i = \frac{l - (i-1) K_D - 1}{K_D} \quad \text{для } i = 1, \dots, K-1,$$

$$D_i = \frac{l - (i-1) K_D - 1}{L - (K-1) K_D - 1} \quad \text{для } i = K$$

$K$  - число калибровок,  $L$  - число строк,  $K_D$  - дискрет калибровок;

б) по калибровкам электрической длины СВЧ тракта

$$A_{jl} = A_{jl}^{\text{изм}},$$

$$\varphi_{jl} = \varphi_{jl}^{\text{изм}} - \frac{1}{2} (\varphi_{i-1}^{\text{ср}} - \varphi_1^{\text{ср}}) - \frac{1}{2} (\varphi_i^{\text{ср}} - \varphi_{i-1}^{\text{ср}}) D_i$$

в) по калибровке по первой и последней строке

$$A_{jl} = A_{jl}^{\text{изм}} \left[ 1 + (A_K - 1) \frac{l-1}{L-1} \right]^{-1},$$

$$\varphi_{jl} = \varphi_{jl}^{\text{изм}} - \varphi_K \frac{l-1}{L-1}, \quad l = 2, \dots, L-1,$$

$$A_K = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^G \frac{A_{jL}}{A_{j1}}, \quad \varphi_K = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^G (\varphi_{jL} - \varphi_{j1}).$$

Осуществляются также преобразования данных, связанные с переходом из системы координат зонда в систему координат зеркала антенны - так называемая "поляризационная коррекция":

а) при измерениях на круговой поляризации

$$\varphi_{jl} = \varphi_{jl}^{\text{изм}} + \Pi (\beta_{\text{центр}}^c - \beta_j^c - A_{\text{з ант}}),$$

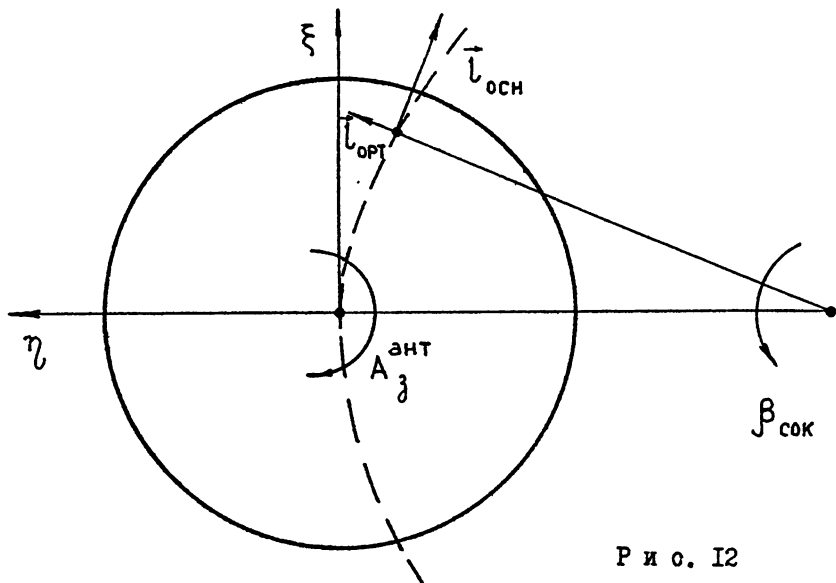
где  $\beta^c$  - угол поворота сканера (см. рис. 12),  $A_{\text{з ант}}$  - азимут антенны,  $\Pi = \pm 1$  в зависимости от направления вращения плоскости поляризации (вводится оператором);

б) при измерениях на линейных поляризациях<sup>+</sup>

$$(A_{jl} e^{i\varphi_{jl}})_{\xi} = A_{jl}^{\text{осн}} e^{i\varphi_{jl}^{\text{осн}}} \cos \alpha_{jl} + \frac{1}{\gamma} A_{jl}^{\text{орт}} e^{i(\varphi_{jl}^{\text{орт}} - \Delta\varphi)} \sin \alpha_{jl},$$

$$(A_{jl} e^{i\varphi_{jl}})_{\eta} = -A_{jl}^{\text{осн}} e^{i\varphi_{jl}^{\text{осн}}} \sin \alpha_{jl} + \frac{1}{\gamma} A_{jl}^{\text{орт}} e^{i(\varphi_{jl}^{\text{орт}} - \Delta\varphi)} \cos \alpha_{jl},$$

$$\alpha_{jl} = \beta_{\text{центр}}^c - \beta_j^c - A_{\text{з ант}}$$



Р и с. 12

<sup>+</sup> Данное преобразование предусматривает расположение зонда на стреле таким образом, что вектора  $\vec{l}_{\text{осн}}$ ,  $\vec{l}_{\text{орт}}$ , характеризующие ориентации плоскостей поляризации зонда, и направление в зенит образуют правую тройку. Направление вектора  $\vec{l}_{\text{орт}}$  вдоль оси стрелы сканера (см. рис. 12).

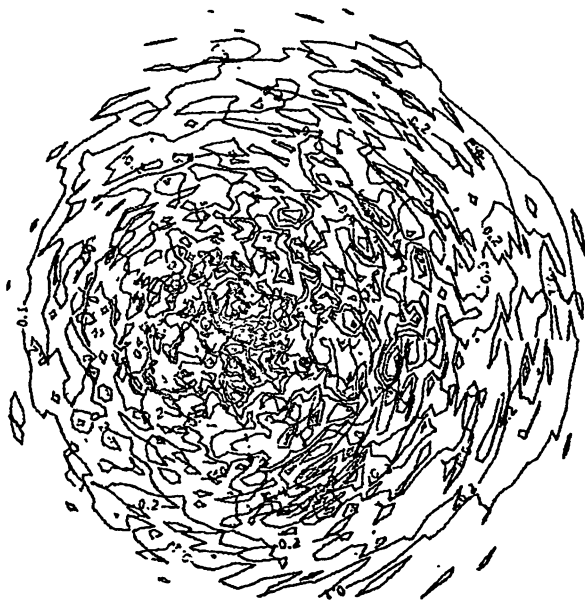


$\gamma$  и  $\Delta\varphi$  характеризуют неравенство коэффициентов передачи зонда на "основной" и "ортогональной" поляризациях (вводятся оператором).

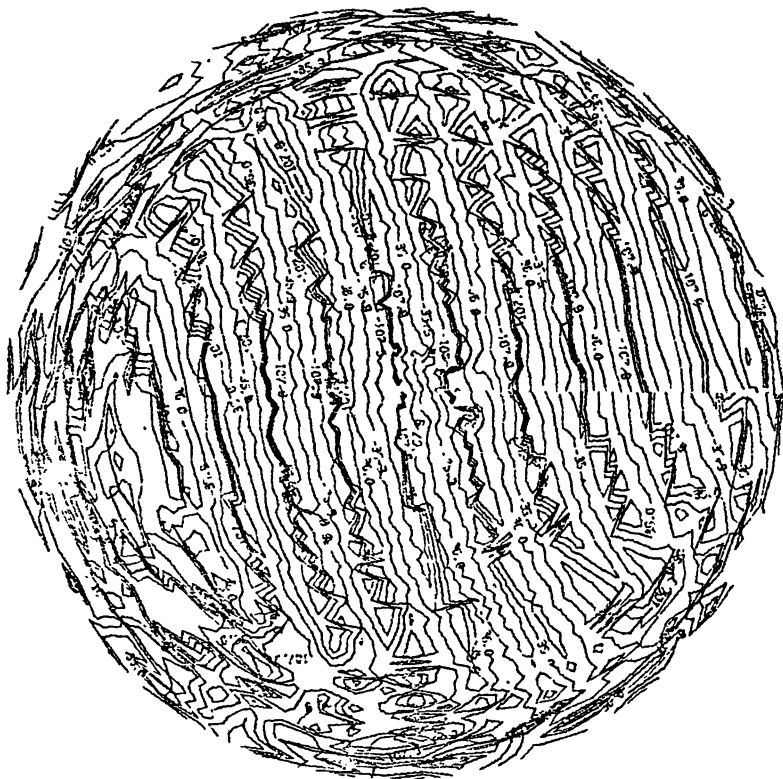
Продолжительность выполнения операций, связанных с преобразованием измеренных величин на ЭВМ стенда НИРФИ составляет от 5 минут (исходный массив 32 x 100) до 13 минут (массив 128 x 63).

Сформированная для вычисления диаграммы направленности матрица данных может быть выведена на перфоленту. На рис. 13 и 14 показаны изображения измеренных распределении амплитуды и фазы поля антенны в ближней зоне, построенные с использованием системы программы ГРАФОР после ввода данных с перфоленты в ЭВМ БЭСМ-6.

Вычисление диаграммы направленности производится по алгоритму /25/, основанному на модификации известного представления преобразования Фурье поля, измеренного на плоскости в виде ряда с использованием функции Бесселя и полиномов Якоби. Оператором задаются значения параметров обработки  $N$ ,  $M$  (число суммируемых членов ряда), и область координат, в которой требуется вос-



Р и с. 13

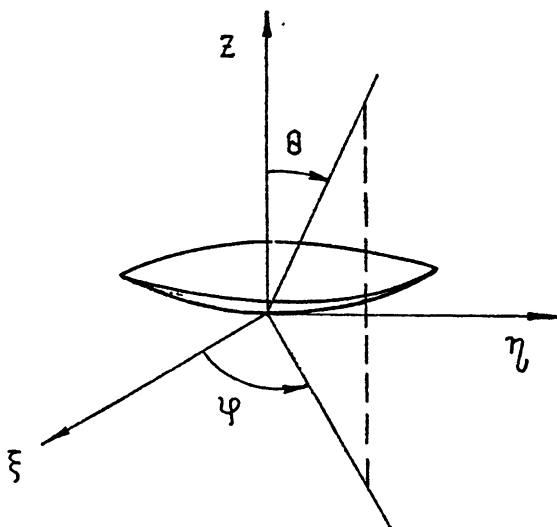


Р и с. 14

становить диаграмму направленности. Вычисление и вывод параметров диаграммы направленности производится в прямоугольной системе координат  $\xi = \sin \theta \cos \varphi$ ,  $\eta = \sin \theta \sin \varphi$ , связанной с зеркалом исследуемой антенны (см. рис. 15). При заданных значениях координат центра области  $\xi_0$ ,  $\eta_0$ , размерах области  $\xi_{\max}$ ,  $\eta_{\max}$  и шаге  $\Delta \xi$ ,  $\Delta \eta$  диаграмма направленности антенны рассчитывается в точках с координатами

$$\xi_i = \xi_0 - \xi_{\max} + \Delta \xi \cdot i, \quad i = 0, \dots, \frac{2 \xi_{\max}}{\Delta \xi},$$

$$\eta_j = \eta_0 - \eta_{\max} + \Delta\eta \cdot j, \quad j = 0, \dots, \frac{2\eta_{\max}}{\Delta\eta}.$$



Р и с. 15

По полученному массиву значений диаграммы направленности программой определяется главный максимум и его координаты, а также вычисляются параметры: ширина главного лепестка на заданном уровне, положение и уровни первых боковых лепестков в восьми направлениях из главного максимума. Образец протокола с расчетом параметров диаграммы направленности показан на рис. 16. На рис. 17, 18 представлены образцы вывода на печать полученных массивов значений диаграммы направленности. Вычисленные значения диаграммы направленности могут быть также выведены на перфоленту. На рис. 19, 20, 21 представлены проекции амплитудной и фазовой диаграмм направленности антенны, полученные после ввода данных в ЭВМ БЭСМ-6.

По окончании вывода результатов предусмотрена возможность вычисления диаграммы направленности в другом секторе углов, либо повторение обработки при новых значениях параметров.

ПАРАМЕТРЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДН :

КООРДИНАТЫ ЦЕНТРА ОБЛАСТИ - .0000 .0000

ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ - .0320 .0320

УГЛОВОЙ ШАГ - .0020

ПОРЯДОК ВПР - 5

РАДИУС ДУГИ - 123.000

УРОВЕНЬ НУЛЯ ДН - .70

КООРДИНАТЫ ГЛАВНОГО МАКСИМУМА - -.0040 .0020

ЗНАЧЕНИЕ - 2.049

БОЮВНЕ ЛЕПЕСТКИ :

КООРДИНАТЫ

УРОВНИ

ШИРИНА ЛЕПЕСТКА

.0173	.0107	-.0040	-.0195	-.0258	-.0190	-.0040	.0110
.0020	.0167	.0235	.0176	.0020	-.0130	-.0189	-.0130
-17.728-18.791-19.656-22.768-24.078-22.133-20.224-21.282ДВ							
.0064	.0064	.0066	.0070	.0072	.0068	.0066	.0065

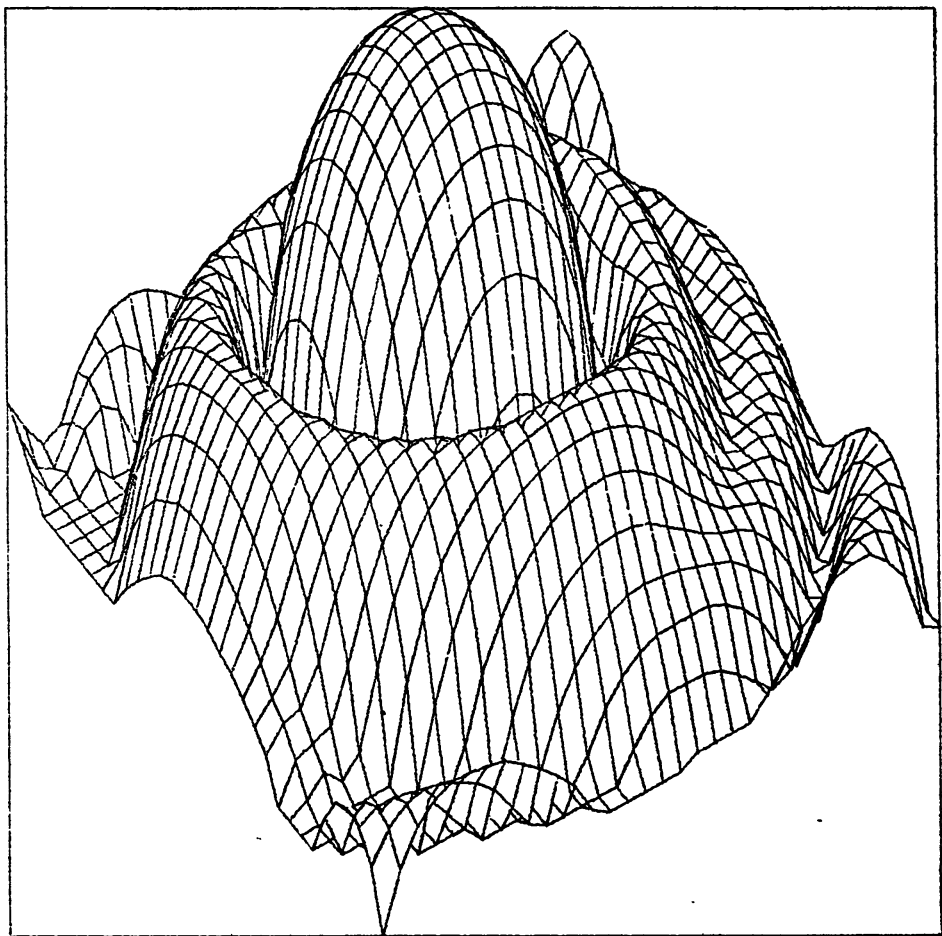
СИМВОЛЬНАЯ КАРТИНА ДН 1

ВГ(\*)= 0 НГ(0)= -30

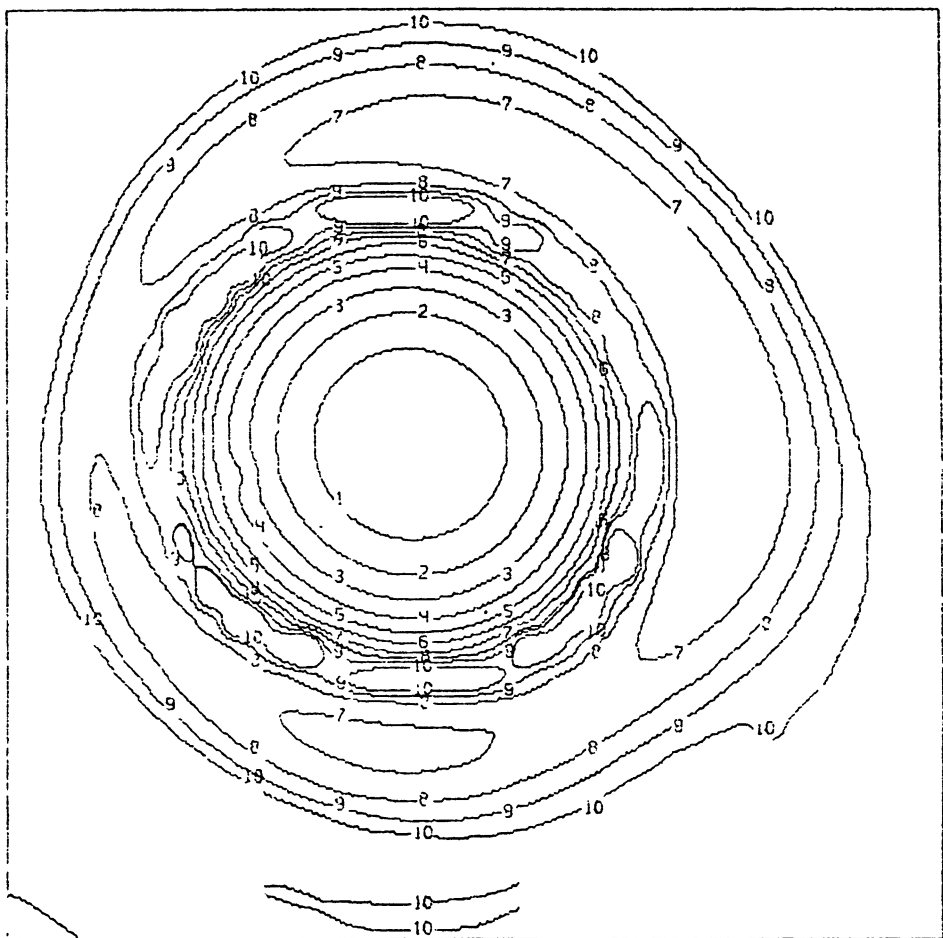
```
00
0
0
      0011111000
      0112221111110
      0112221111111110
      012221100 01122110
      0122210 11211 0122210
      12221 034444431 012221
      12221 13566666542 022220
      01222 0456777776542 122210
      12321 35678888876530023220
0 12320146788999887652 23321
0 02332 257889999988753 233210
0 02332 357899999998763 233210
0 02332 3578999*9998763 233220
0 02332 357899999998753 233220
0 02232 256889999987652 233210
0 0122201467889988876401333210
0 012221 35677888776420233321
0 01222 03566777664302333220
012221 245555542023333210
0122220 123211123333210
0122332210 01233333220
01233333333333333220
0012333333443333220
01123333443333210
000112333333332210
000112222222210
000011111110
0000000
```

Р и с. 17

1-29-29-30-33-40-58-39-34-32-31-31-32-33-33-34-34-35-35-36-36-36-35-33-32-31-31-31-32-35-38-39-36-3  
 2-28-30-32-39-57-38-34-32-32-32-34-35-34-33-31-30-30-30-31-32-35-39-44-42-37-34-33-33-34-36-39-39-3  
 3-29-31-37-58-38-33-32-32-34-36-35-32-29-27-26-25-25-26-27-28-29-31-33-43-51-39-36-35-36-39-41-3  
 4-30-35-50-39-33-31-32-34-37-34-30-27-25-24-23-23-23-24-24-24-25-25-26-28-30-34-43-48-40-38-39-42-3  
 5-33-42-41-34-31-31-34-38-34-28-25-24-23-23-24-24-25-25-25-24-24-24-24-25-27-31-37-50-45-42-43-4  
 6-37-46-35-31-31-33-39-34-28-25-23-22-23-24-26-28-29-31-32-31-29-26-24-23-23-24-26-29-35-45-53-47-4  
 7-44-37-32-30-32-37-36-28-24-23-22-23-25-29-30-26-24-23-24-26-34-40-28-24-23-22-23-26-29-35-44-54-4  
 8-43-35-30-30-34-39-30-25-22-22-22-26-34-27-20-17-15-15-15-17-19-25-37-29-24-22-22-23-26-30-36-45-4  
 9-37-31-30-31-37-33-26-23-21-22-25-38-25-18-14-11-10-10-10-11-13-16-24-34-27-22-21-22-23-27-32-38-4  
 10-34-30-30-33-37-29-24-21-21-23-31-27-17-13 -9 -8 -6 -6 -7 -9-12-16-23-33-24-21-21-22-25-29-34-4  
 11-32-30-30-34-33-26-22-20-21-25-38-20-13 -9 -6 -5 -4 -3 -4 -5 -6 -9-12-18-28-27-22-20-21-23-27-32-3  
 12-31-29-30-35-30-24-21-20-21-28-26-16-10 -7 -4 -3 -2 -2 -2 -3 -4 -6-10-14-23-31-22-20-20-22-25-30-3  
 13-31-29-31-34-28-23-20-20-22-31-22-13 -8 -5 -3 -2 -1 0 -1 -1 -3 -5 -8-12-20-34-23-20-20-21-24-29-3  
 14-30-29-31-33-27-23-20-20-23-33-19-12 -7 -4 -2 -1 0 0 -1 -1 -2 -4 -7-11-18-34-23-20-19-21-24-28-3  
 15-30-29-31-32-27-22-20-20-23-33-19-12 -7 -4 -2 -1 0 0 0 -1 -2 -4 -7-11-18-34-23-20-19-21-23-27-3  
 16-30-29-30-31-27-23-20-20-23-33-19-12 -8 -4 -2 -1 0 0 0 -1 -2 -5 -8-12-20-34-22-19-19-21-23-27-3  
 17-31-29-30-31-27-23-21-20-23-33-21-13 -9 -5 -3 -2 -1 -1 -1 -2 -3 -6 -9-14-22-30-21-19-19-21-24-28-3  
 18-31-29-30-31-28-24-21-21-22-29-25-16-11 -7 -5 -3 -2 -2 -3 -3 -5 -8-11-17-28-25-20-19-19-21-24-28-3  
 19-32-30-29-30-29-25-22-21-22-26-35-20-14-10 -7 -6 -5 -4 -5 -6 -8-10-15-22-29-22-19-19-20-22-25-30-2  
 20-33-30-29-30-30-27-24-22-21-23-30-29-19-14-11 -9 -8 -8 -8 -9-11-15-20-28-23-20-19-19-21-23-27-31-3  
 21-35-31-30-30-31-29-25-23-21-21-24-32-31-21-17-14-13-12-13-14-17-22-27-23-20-19-19-20-22-25-29-32-  
 22-36-33-30-30-30-27-24-22-21-21-23-27-43-30-24-21-20-21-24-26-26-22-20-19-18-19-21-24-28-32-34-  
 23-37-35-31-30-30-31-29-26-23-21-20-20-21-23-25-28-30-30-28-25-22-20-19-18-18-19-21-23-27-31-34-35-  
 24-35-37-33-31-30-30-30-28-25-22-20-19-19-19-19-20-20-20-20-19-19-18-18-18-19-21-23-27-31-36-36-36-  
 25-33-37-36-32-30-30-30-29-27-24-22-20-19-18-18-18-18-18-17-17-18-18-18-19-21-23-27-31-37-38-37-39-  
 26-32-35-38-35-32-30-30-30-29-26-24-21-20-19-18-18-17-17-17-18-18-19-20-22-24-27-32-39-42-39-40-45-  
 27-31-33-37-38-34-31-30-29-29-26-26-24-22-20-19-19-19-19-19-20-21-23-25-29-33-42-48-44-41-47-54-  
 28-30-31-34-38-38-34-31-30-29-29-28-26-24-23-22-21-21-21-21-22-23-25-28-31-36-46-52-44-44-49-50-40-  
 29-31-31-32-35-39-38-34-32-30-29-29-28-27-26-25-25-24-25-25-26-28-31-34-40-52-50-45-45-47-44-39-35-  
 30-32-31-31-32-35-38-39-35-33-31-30-29-29-28-28-28-28-29-30-32-34-38-45-62-48-45-44-42-39-36-34-33-  
 31-34-32-31-31-32-34-38-39-37-34-33-32-31-31-31-31-32-33-35-37-41-48-57-47-43-40-38-36-34-33-32-32-  
 32-39-34-32-31-31-32-33-36-38-39-37-36-35-34-34-35-36-37-40-44-48-46-42-39-36-35-33-32-31-31-32-33-  
 33-55-39-34-32-31-30-31-32-34-36-37-38-39-39-39-40-40-41-42-40-38-36-35-33-32-31-30-30-30-31-32-35-

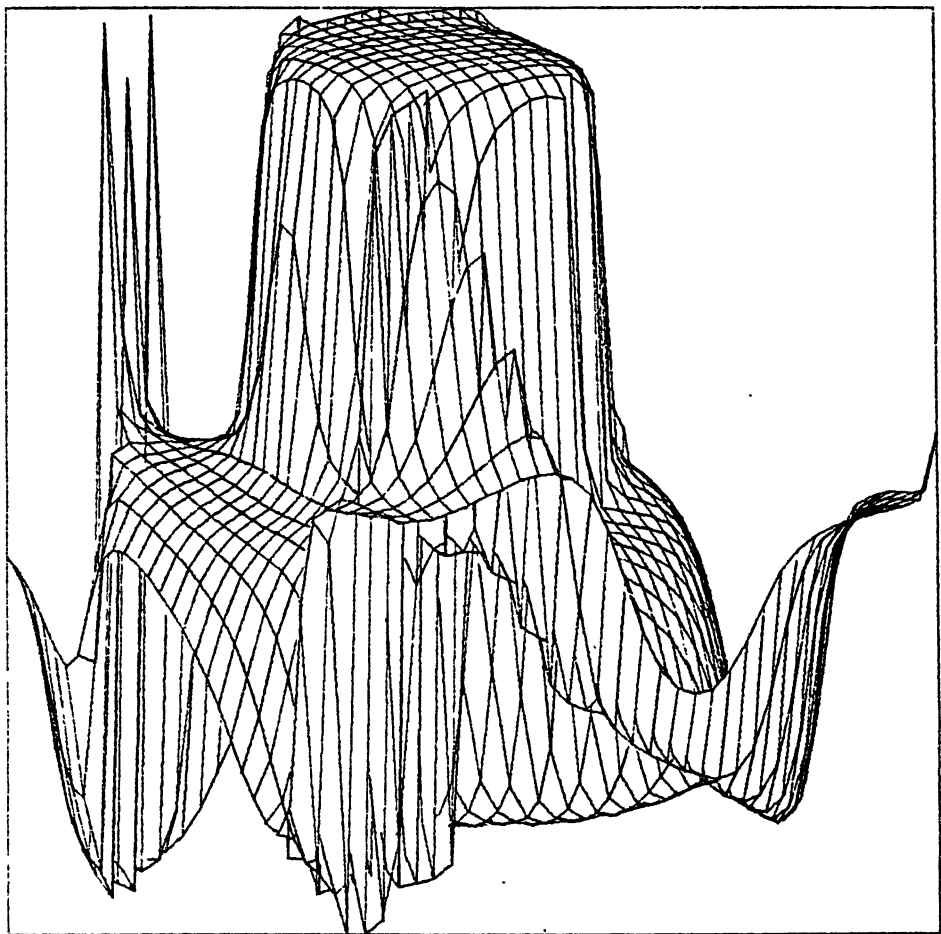


Р и с. 19



Р и с. 20





Р и с . 21

#### 4. Методика определения коэффициента усиления антенны по полю в ближней зоне

В настоящее время разработаны различные способы определения коэффициента усиления (КУ) антенн по измерениям поля в ближней зоне. В работе /8/ изложена методика определения КУ зеркальных космических антенн способом замещения, в котором последовательно производится зондирование поля в ближней зоне исследуемой антенны и вспомогательной эталонной антенны с известным КУ. КУ исследуемой антенны определяется в этом случае из сравнения максимальных значений поля в дальней зоне исследуемой и эталонной антенн, полученных в результате обработки измеренных данных. Приведенные в данной работе результаты определения КУ антенн диаметром 4,8 м и 1,47 м имеют совпадение не хуже  $\pm 0,3$  дБ с расчетными данными и результатами измерений в дальней зоне. В этой же работе рассматривается возможность распространения на измерения в ближней зоне метода трех антенн. При этом КУ вспомогательной антенны может быть неизвестен, а измерение поля в ближней зоне должно проводиться трижды: для исследуемой антенны, для вспомогательной и для зонда, после чего может быть определен КУ всех трех антенн.

Существуют также способы определения КУ исследуемой антенны, в которых после измерения поля в ее ближней зоне выполняется один калибровочный замер сигнала с использованием антенны с известным КУ. В работе /5/ изложен метод, применяемый в Национальном бюро стандартов США для градуировки по КУ образцовых СВЧ антенн с усилением более 25 дБ. В данном методе эталоном усиления служит зонд, КУ которого  $G_z$  предварительно измеряется. Для определения КУ исследуемой антенны используется нормированный массив измеренных в ближней зоне данных  $U(x, y)$  и значение коэффициента передачи мощности  $K_{\Gamma}(x_0, y_0)$  между зондом и облучателем исследуемой антенны, измеренное в точке  $(x_0, y_0)$  максимума амплитуды сигнала в ближней зоне. Для плоской поверхности и прямоугольной сетки сканирования с дискретами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  в случае, если направление максимума диаграммы направленности исследуемой антенны перпендикулярно плоскости измерений, формула для определения КУ имеет вид:

$$G_{н.а}(0) = \left( \frac{4\pi \Delta x \Delta y}{\lambda^2} \right)^2 K_n(x_0, y_0) \frac{|\sum u(x, y)|^2}{G_3}$$

При этом погрешность определения КУ исследуемой антенны состоит в основном из погрешностей измерений КУ зонда и коэффициента передачи мощности между облучателем исследуемой антенны и зондом. По данным работы /5/ суммарная погрешность определения КУ исследуемой антенны данным методом может быть сведена к величине от  $\pm 0,15$  дБ до  $\pm 0,25$  дБ.

Для используемой на стенде НИРФИ схемы сканирования приведенное соотношение расчета КУ было преобразовано к виду

$$G_{н.а}(\theta_0, \varphi_0) = \frac{K_n(x_0, y_0)}{(\lambda^2/4\pi)^2 G_3} |\mathcal{f}(\theta_0, \varphi_0)|^2,$$

где  $\mathcal{f}(\theta, \varphi)$  - диаграмма направленности исследуемой антенны, восстановленная по нормированному распределению  $u(x, y)$  поля в ближней зоне, и имеющая размерность площади

$$\mathcal{f}(\theta, \varphi) = \cos \theta \left| \iint u(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy \right|;$$

$\theta_0, \varphi_0$  - координаты главного максимума ДН.

Данная формула может быть использована для произвольной сетки сканирования и любом направлении  $\theta_0, \varphi_0$  максимума диаграммы направленности. Можно также показать, что она применима для определения КУ исследуемой антенны по полю в ближней зоне на неплоской поверхности при соответствующем вычислении значения максимума диаграммы направленности.

Недостатком рассмотренного выше способа определения КУ является возрастание абсолютной погрешности при существенной разности усиления зонда и исследуемой антенны. В монографии /1/ описана похожая методика определения КУ по измерениям в ближней зоне, при которой в качестве эталона усиления используется вспомогательная антенна. Эталонная антенна располагается в данном случае в зоне перемещения зонда рядом с исследуемой антенной. После измерения рас-

предела поля в ближней зоне исследуемой антенны вход измерительного канала амплифазометра переключается на выход эталонной антенны, и измеряется сигнал при расположении зонда в направлении, соответствующем максимуму ее диаграммы направленности. Формула для расчета КУ исследуемой антенны в данном случае имеет вид

$$G_{и.а} = G_{э.а} \frac{|U_{\max}|^2}{|U_{э.а}|^2} \left( \frac{1}{\lambda R} \right)^2 |\varphi(\theta_0, \varphi_0)|^2,$$

где  $U_{\max}$  - максимальное значение амплитуды сигнала, измеренного в ближней зоне исследуемой антенны;  $U_{э.а}$  - измеренная амплитуда сигнала эталонной антенны;  $R$  - расстояние между зондом и эталонной антенной при калибровочном замере сигнала;  $G_{э.а}$  - КУ эталонной антенны. В данном методе КУ эталонной антенны может превышать КУ зонда, необходимо лишь, чтобы при проведении калибровочного замера выполнялось условие дальней зоны для обеих антенн.

Приведенные соотношения для определения КУ предусматривают, что максимальное значение диаграммы направленности  $\varphi(\theta_0, \varphi_0)$  получено с сохранением при обработке всех постоянных коэффициентов  $\lambda$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $D_a$ . Во всех рассмотренных способах определения КУ антенны, как и при традиционных методах абсолютных измерений, должны быть приняты соответствующие меры по обеспечению неизменности КУ приемной аппаратуры, мощности передатчиков, а также идентичности СВЧ трактов, соединяющих вход приемника с выходами исследуемой и вспомогательной антенн.

На стенде НИРФИ при определении КУ исследуемой антенны в качестве эталона усиления использовался измерительный зонд. Коэффициент передачи мощности между зондом и облучателем в точке максимума поля в ближней зоне измерялся с помощью дополнительного калиброванного по ослаблению СВЧ кабеля.

Очевидно, что на стенде подб.с.й конфигурации может быть также реализована методика определения КУ исследуемой антенны с помощью вспомогательной эталонной антенны, установленной в нерабочем секторе вращения зонда.

## 5. Результаты экспериментального исследования точностных характеристик стенда

Определение точностных характеристик может быть выполнено путем измерения на данном стенде поля в ближней зоне и восстановления поля в дальней зоне вспомогательной антенны, которая была предварительно "эталонирована" на установке более высокого класса точности /1,2,30/. Используемая на стенде НИРФИ схема сканирования позволяет реализовать такую аттестацию при расположении эталонной антенны рядом с исследуемой в "нерабочем" секторе вращения зонда. Однако подобные измерения не проводились на стенде НИРФИ по следующим причинам. Во-первых, поскольку погрешности восстановления характеристик антенны амплифазометрическим методом (аппаратурные, методические и погрешности обработки) зависят от ее размеров, то размеры эталонной и исследуемой антенн должны быть близки, то есть в нашем случае необходима эталонная антенна с диаметром зеркала порядка 7...12 метров. Во-вторых, как будет показано ниже, точность измерения поля антенны в ближней зоне на стенде НИРФИ довольно высока. При соответствующем выборе режимов измерений среднеквадратичные отклонения измеряемых значений амплитуды и фазы поля могут быть сведены к величинам  $\sigma_a \sim 1\%$ ,  $\sigma_\varphi \sim 1^\circ$  +). При использовании эталонной антенны на данном стенде ее поле в ближней зоне должно быть известно с не менее высокой точностью. Очевидно, что создание эталонного поля антенны с указанными размерами и точностью весьма затруднительно. Поэтому на стенде НИРФИ был реализован другой распространенный (см., например, /1,2,6/) способ метрологической аттестации установок для определения характеристик антенн по полю в ближней зоне, заключающийся в измерении и анализе отдельных составляющих погрешности.

Как известно (см., например, /1,2/), факторами, ограничивающими точность определения характеристик антенн амплифазометрическим методом, являются:

- погрешности измерения амплитуды и фазы поля антенны в ближней зоне (инструментальные погрешности);

---

+ ) Для сравнения заметим, что согласно ГОСТу /30/ в установках I класса (высокой точности) для измерения поля в ближней зоне остронаправленных антенн допускается среднеквадратичное отклонение измеряемых значений  $\sigma_a \leq 7\%$ ,  $\sigma_\varphi \leq 4^\circ$ .

- методические погрешности, связанные с ограниченностью области измерений и дискретностью перемещения зонда;

- погрешности алгоритма обработки.

Влияние инструментальных погрешностей на восстановление характеристик антенны амплифазометрическим методом исследовано в ряде работ /1...3,6,31,32/ экспериментально и с помощью моделирования на ЭВМ. Получены теоретические оценки связи отдельных составляющих ошибок измерения поля антенны в ближней зоне с точностью определения параметров диаграммы направленности. С учетом подобных оценок проводился анализ величин составляющих инструментальной погрешности на стенде НИРФИ.

При анализе источников инструментальной погрешности на стенде НИРФИ исследовались погрешности, обусловленные отдельными приборами (амплифазометром, генератором, системой синхронизации частоты), СВЧ узлами (вращающимся соединением, коммутаторами, линиями передачи), элементами конструкции стенда, определяющими точность измерения координат (опорно-поворотными устройствами сканера и антенны, узлами крепления зонда, датчиков угловых координат и т.п.).

К инструментальным погрешностям можно отнести также ошибки измерения, обусловленные "паразитными" переотражениями между исследуемой антенной и сканером. Метод и результаты исследования погрешностей данного типа на стенде НИРФИ рассмотрены в /28, 29/.

Для определения величины результирующей случайной составляющей погрешности измерения поля антенны в ближней зоне проводились измерения в контрольном режиме со статистической обработкой данных. По полученным результатам осуществлялась коррекция методики измерения поля антенны, а также доработка отдельных блоков и узлов, направленные на уменьшение погрешности измерения поля антенны.

Погрешности определения характеристик антенны, связанные с ограниченностью области измерений и дискретностью перемещения зонда, а также погрешности алгоритма обработки, могут быть, как правило, минимизированы путем соответствующего выбора режима измерений и обработки. Для определения величин погрешностей данного типа на стенде НИРФИ выполнялись измерения характеристик антенны в различных режимах. Проводилось также сравнение результатов восстановления характеристик антенны амплифазометрическим методом с

данными, полученными радиоастрономическим методом.

Ниже приведены основные результаты экспериментальных исследований точностных характеристик стенда НИРФИ.

### 5.1. Исследование точностных характеристик амплифазометра

Точностные характеристики амплифазометра типа ФК2-24 в диапазоне частот 3,2...5,6 ГГц приведены в его Техническом описании. При полосе частот индикатора 2 кГц и уровнях, измеряемых на данном стенде сигналов от  $10^{-8}$  Вт до  $10^{-12}$  Вт, они не должны превышать величин:

- случайные составляющие погрешности  $\sigma_a \leq 8\%$ ,  $\sigma_\varphi \leq 0,7^\circ$ ;
- систематические погрешности  $\Delta A \leq \pm 10\%$  ...  $\pm 30\%$   
 $\Delta \varphi \leq \pm 3^\circ$  ...  $\pm 6^\circ$ .

Определение точностных характеристик используемого амплифазометра на рабочей частоте  $f_0 = 5$  ГГц проводилось в режиме контрольных измерений с помощью программ статистической обработки. Для измерения систематических погрешностей амплифазометра использовались высокоточный перестраиваемый аттенуатор типа ДЗ-28 и встроенная в тракт опорного канала эталонированная линия переменной длины. При уровне мощности измеряемого сигнала  $10^{-8}$ ... $10^{-12}$  Вт и различных значениях разности фаз значения погрешностей амплифазометра не превышали величин  $\sigma_a \approx 0,5\%$ ;  $\Delta A \leq \pm 3\%$  и  $\sigma_\varphi \approx 0,25^\circ$ ,  $\Delta \varphi \leq \pm 1,5^\circ$ . Полученная при измерениях в указанном динамическом диапазоне независимость погрешности амплифазометра от значений измеряемой разности фаз существенна при реализованной на стенде схеме сканирования с вращением исследуемой антенны, когда требуется одинаково высокая точность измерения фазы в диапазоне  $\pm 180^\circ$ .

При измерении характеристик антенн радиоголографическим методом помимо высокой точности определения параметров сигналов требуется также стабильность показаний амплифазометра за время сканирования поля антенны. Для анализа стабильности работы амплифазометра на стенде НИРФИ на вход прибора подавался фиксированный сигнал и проводился опрос его показаний за время порядка характерного времени сканирования поля антенны. После устранения из измеренных данных линейного тренда определялись статистические характеристики сигналов. Среднеквадратичные отклонения от средних значений составили для амплитуды  $\sigma_a \approx 0,7\%$ , для фазы  $\sigma_\varphi \approx 0,35^\circ$ . Максимальные

отклонения измеренных значений от средних не превышали величин  $\pm 2\%$  по амплитуде и  $\pm 1^\circ$  по фазе. Изменения показаний прибора (особенно амплитудные) имели вид медленных дрейфов с характерным временем порядка единиц-десятков минут. Полученные количественные характеристики стабильности работы амплифазометра использовались при сравнительном анализе источников ошибок измерения поля антенны на стенде НИРФИ.

## 5.2. Исследование случайных составляющих погрешности измерения поля антенны

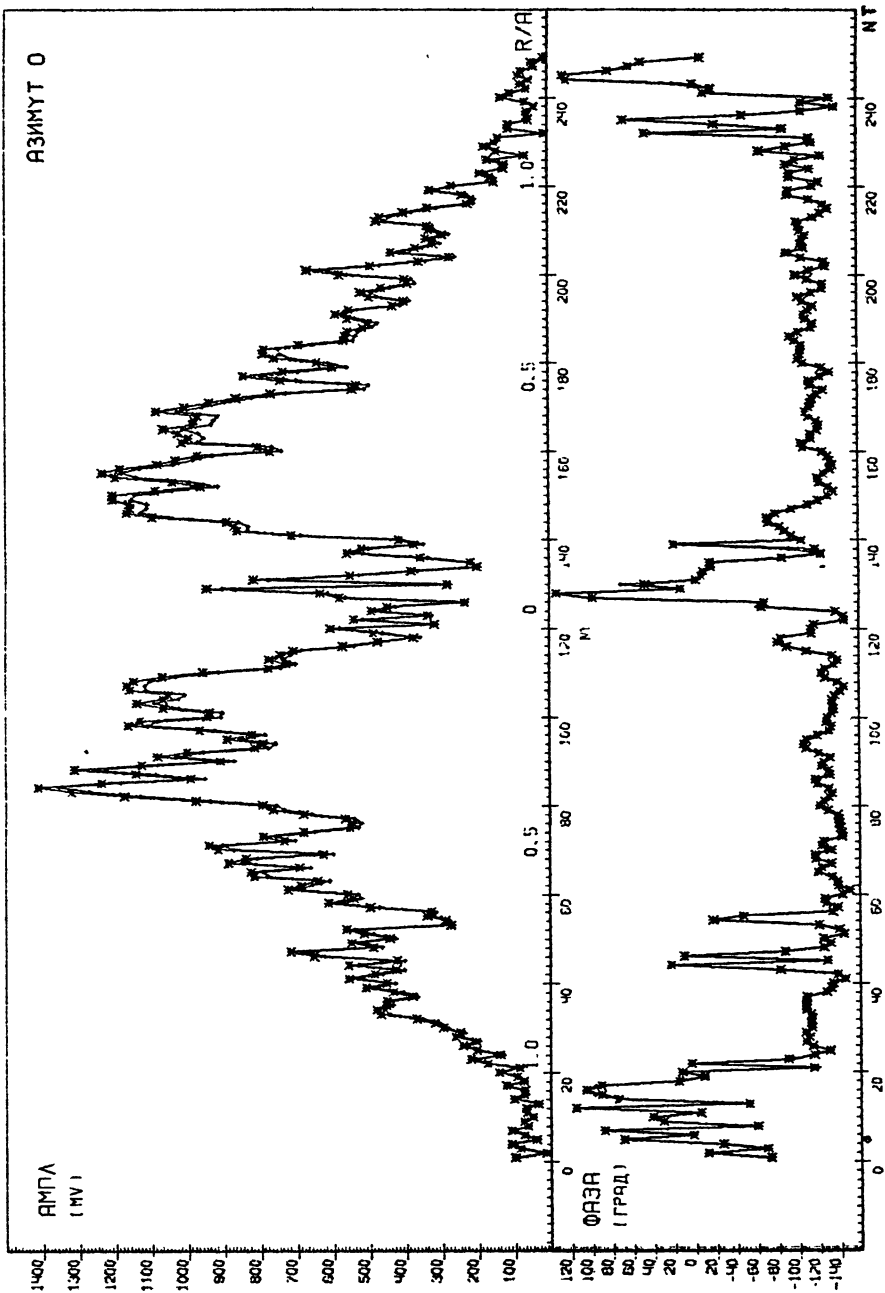
Для качественной оценки величины случайных ошибок измерений проводилось сравнение отдельных реализаций полученного пространственного распределения поля антенны в ближней зоне. При этом, несмотря на осциллирующий характер зависимостей амплитуды и фазы поля от координат, наблюдалась хорошая повторяемость "тонкой" структуры. На рис. 22 представлены результаты двух последовательных измерений сечения поля антенны, проведенных с интервалом в 15 минут, демонстрирующие стабильность работы аппаратуры и "жесткость" элементов конструкции стенда.

Количественный анализ статистических свойств измеряемых сигналов проводился с использованием программ управления и обработки контрольного режима измерений. С учетом осевой симметрии установки контрольные измерения проводились при неподвижной антенне и вращении стрелы сканера. Программа управления выполняла измерение и накопление значений амплитуд и фаз поля антенны в заданных точках сектора сканирования. Программа обработки рассматривала данные, измеренные в одной точке, как массив реализации случайной величины и определяла его статистические характеристики.

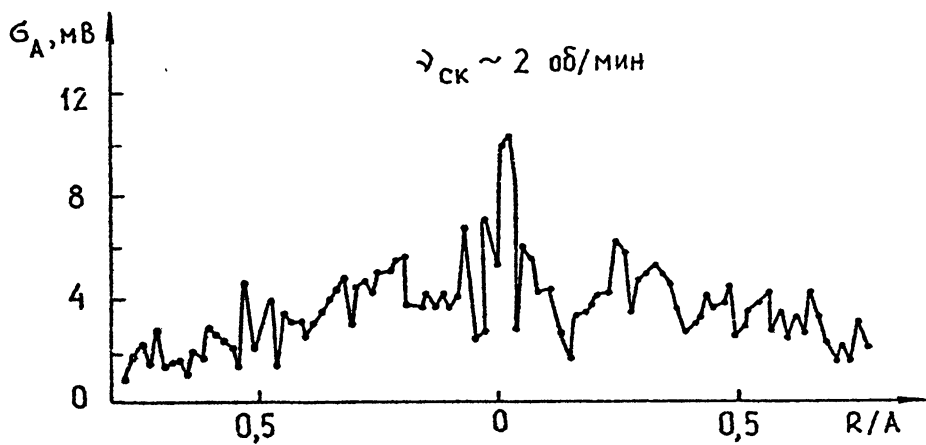
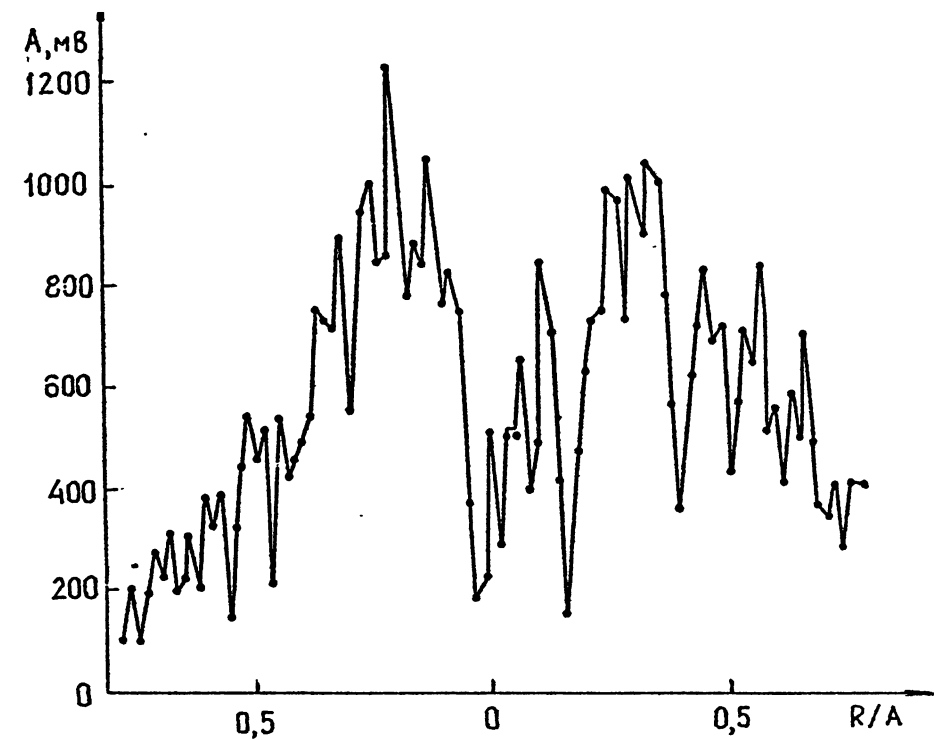
Для определения зависимости величины случайной составляющей погрешности от координаты проводилось измерение нескольких реализаций сечения поля антенны с последующим вычислением в каждой точке средних значений амплитуды и фазы и отклонений от них. На рис. 23 и 24 показаны сравнение пространственных зависимостей средних значений амплитуды и фазы поля и их среднеквадратичных отклонений. Дисперсия амплитуды имеет максимальное значение (порядка 5% от уровня сигнала) при измерениях над центром апертуры антенны. Там же получены "выбросы" дисперсии фазы.

По этой причине - из-за возрастания погрешности измерений

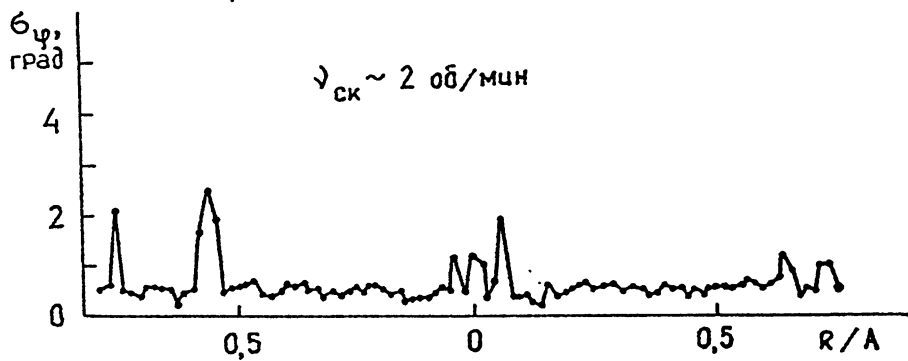
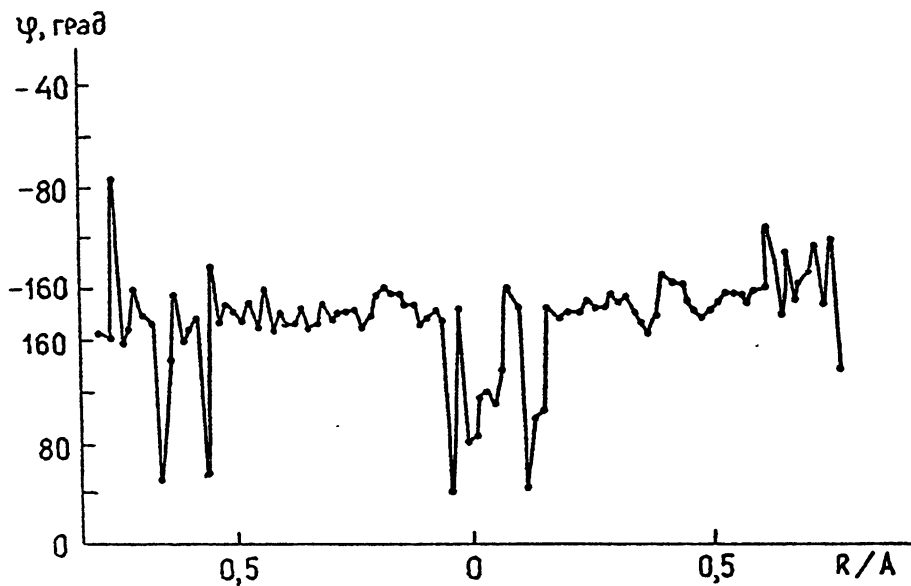




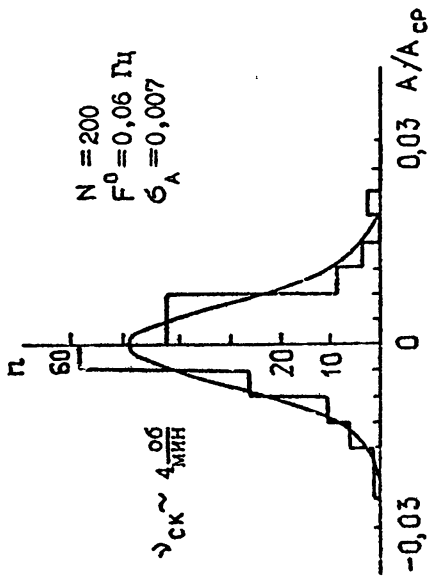
Р и с. 22



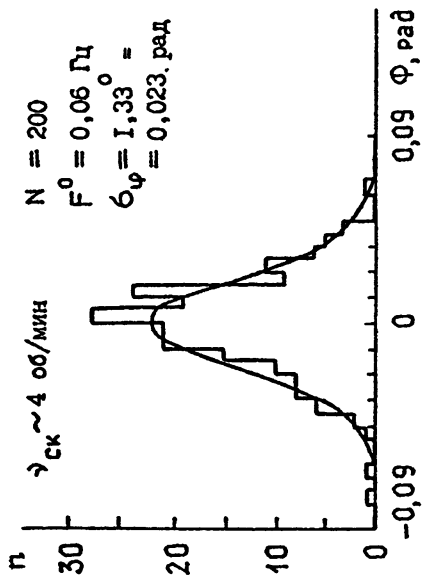
Р и с. 23



Р и с. 24

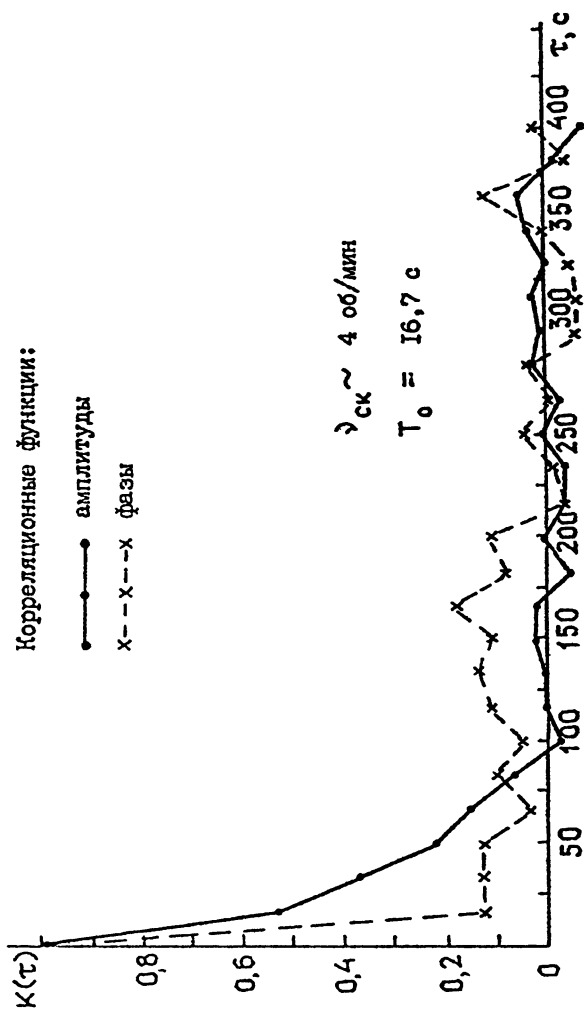


в)



б)

Р и с. 25



Р и с. 26

над центром апертуры антенны - на стенде не проводились калибровки аппаратуры и трактов таким, казалось бы, очевидным для данной схемы сканирования способом, как по сигналу в центральной точке.

Анализ статистических свойств измеряемого сигнала проводился также в отдельных фиксированных точках сектора сканирования, с уровнем сигнала, превышающим средний по сечению.

Исследовалась зависимость случайных составляющих погрешности измерения поля антенны от скорости вращения стрелы сканера. При этом продолжительность контрольных измерений соответствовала максимальному времени измерения распределения поля антенны на данной скорости и составляла 15...40 минут при частоте вращения стрелы сканера 2...12 об/мин.

В таблице I приведены полученные значения случайных составляющих погрешности измерения поля антенны для разных скоростей вращения стрелы сканера. На рис. 25 и 28 для скоростей вращения сканера 4 об/мин и 11 об/мин соответственно, показаны гистограммы отклонений измеренных данных в сравнении с функциями плотности нормальных распределений, рассчитанными по полученным значениям среднего и дисперсии. На рис. 26, 27 и 29, 30 представлены автокорреляционные функции и спектры плотности мощности ошибок измерения амплитуды и фазы поля на тех же скоростях вращения стрелы сканера. В таблице 2 приведены коэффициенты корреляции значений амплитуды и фазы поля, измеренных в одной точке сектора сканирования, а также коэффициенты корреляции сигналов, измеренных в двух фиксированных точках, расстояние между которыми соответствует размеру сектора сканирования.

Представленные результаты демонстрируют то, что распределения ошибок измерения амплитуды и фазы поля антенны на стенде НИРФИ близки к нормальным. Оценки по критерию  $\chi^2 / 33$  подтверждают гипотезу о нормальности распределения ошибок при уровне значимости не менее 50% для данных рис. 25б, 28а, б и порядка 9% для данных рис. 25а.

Ошибки измерения поля антенны обусловлены несколькими независимыми причинами. На малых скоростях вращения стрелы сканера ( $\gamma_{ск} \sim 2...4$  об/мин) они определяются в основном погрешностями амплитудозома, при этом ошибки измерения амплитуды и фазы слабо коррелированы. С увеличением скорости вращения стрелы сканера происходит возрастание ошибок измерений, в первую очередь фазовых, с од-

Таблица 1

Случайные составляющие погрешности измерения поля антенны в фиксированной точке сектора измерений при различных скоростях вращения стрелы сканера

Частота вращения стрелы сканера $\nu_{ск}$ (об/мин)	Среднеквадратичная погрешность		Максимальная погрешность, не более	
	амплитуды (%)	фазы (град)	амплитуды (%)	фазы (град)
2	0,7	0,8	2,0	5,0
4	0,7	1,3	3,0	5,0
II	0,9	3,2	3,0	10,0

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции сигналов, измеренных в ближней зоне антенны при различных скоростях вращения стрелы сканера

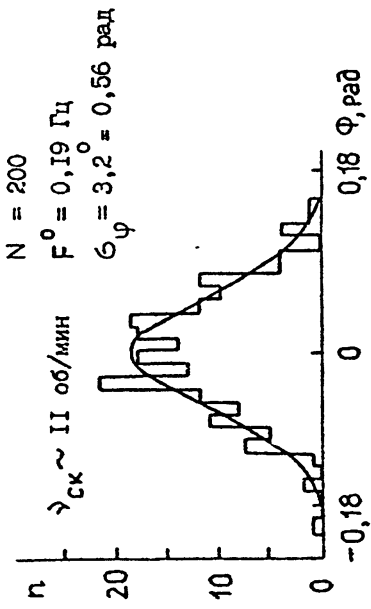
Частота вращения стрелы сканера $\nu_{ск}$ (об/мин)	Коэффициенты корреляции		
	амплитуды и фазы в одной точке сектора измерений	амплитуды в двух фиксированных точках сектора измерений ( $\Delta R \sim \alpha$ )	фазы в двух фиксированных точках сектора измерений ( $\Delta R \sim \alpha$ )
4	0,5	0,8	0,8
II	0,8	0,6	0,6



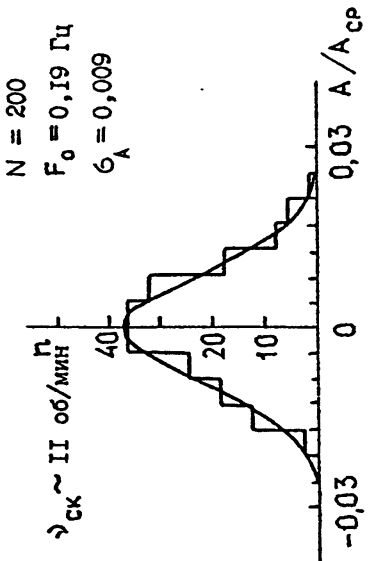
Р и с. 27

новременным увеличением корреляции фазовых и амплитудных ошибок. Следовательно, на больших скоростях вращения стрелы сканера преобладающими становятся ошибки, связанные с колебаниями зонда. По значениям фазовых отклонений амплитуда колебаний зонда на частоте вращения  $\omega_{ск} \sim 11 \text{ об/мин}$  оценивается величиной  $\Delta z_{\max} \leq \pm 2 \text{ мм}$ . В приведенных на рис. 27 и 30 зависимостях взаимной спектральной плотности фазовых и амплитудных ошибок заметно выделение частот, составляющих десятые доли частоты вращения стрелы сканера. Значения коэффициентов  $K_{A_1 A_2}$  и  $K_{\Phi_1 \Phi_2}$ , приведенные в таблице 2, свидетельствуют о корреляции ошибок измерения в пределах сектора сканирования на одном обороте стрелы и подтверждают тем самым то, что характерное время колебаний зонда превышает период вра-



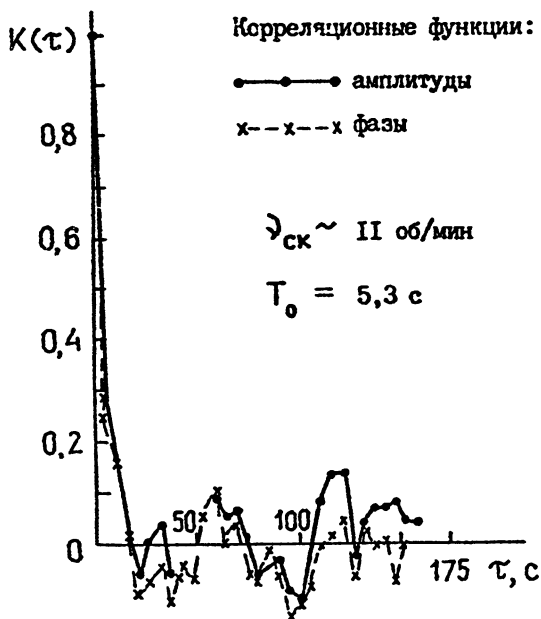


а)



б)

Р и с. 28



Р и с. 29

установки в исходное положение.

Можно отметить, что проведенный анализ статистических свойств измеряемых сигналов показал практическое отсутствие ошибок, вносимых нестабильностью характеристик линий передач. Это свидетельствует об эффективности применения на стенде схемы канализации СВЧ энергии с вращающимся соединением при фиксированном расположении линий передач, выполненных из фазостабильного кабеля.

### 5.3. Сравнение результатов определения характеристик антенны в дальней зоне, полученных амплифазометрическим и радиоастрономическим методами

Сравнение параметров диаграммы направленности антенны, полу-

чения стрелы сканера.

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что при частоте вращения стрелы сканера порядка 2...4 об/мин для измерения поля антенны с высокой точностью достаточно проведения калибровки только в начале и в конце сеанса с последующей коррекцией данных методом устранения линейного тренда. Для реализации подобной калибровки в рассматриваемой схеме сканирования удобно проводить дополнительное измерение сечения (строки) поля после завершения антенной полного оборота по азимуту и

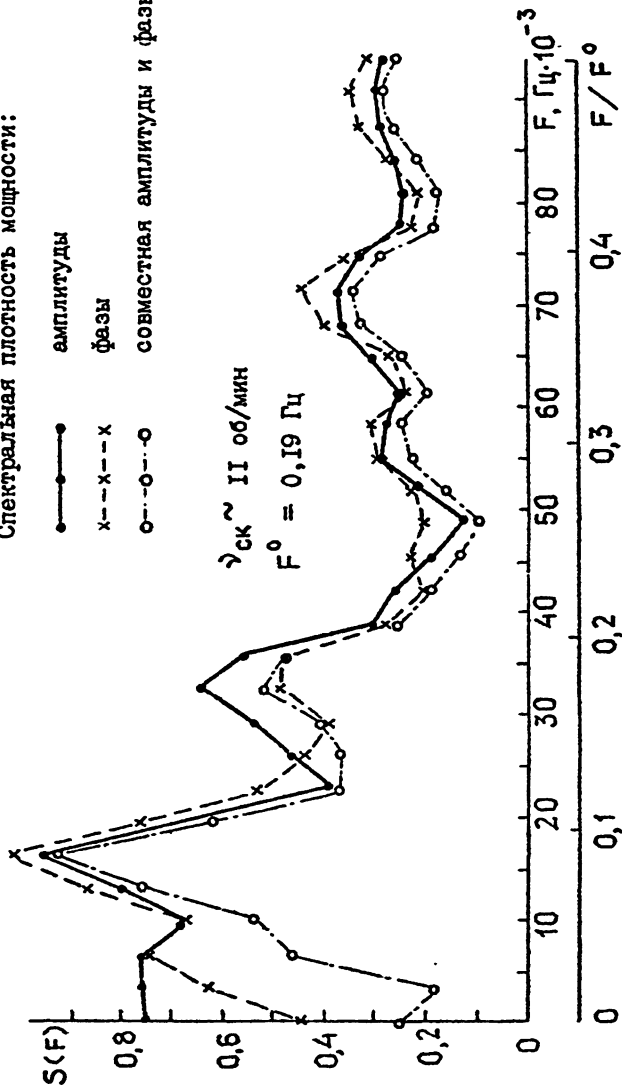
Спектральная плотность мощности:

● — амплитуды

x — фазы

○ — совместная амплитуды и фазы

$\gamma_{ск} \sim II$  об/мин  
 $F^0 = 0,19$  Гц



Р и о. 30

ченных амплифазометрическим и радиострономическим методами проводилось в процессе остировки антенны, когда измерялись сечения диаграммы направленности при различных положениях облучателя в фокусе зеркала. Расхождение параметров диаграммы направленности, измеренных двумя методами при разъюстировке до  $30'$ , не превышало величин:

- $\pm 1'$  для координат главного максимума,
- $\pm 3'$  для ширины главного лепестка по уровню  $-3$  дБ,
- $\pm 1'$  дБ для уровня первых боковых лепестков.

Для определения коэффициента усиления антенны по результатам измерения поля в ближней зоне использовалась методика, изложенная в четвертом разделе данной работы. Полученное при этом значение коэффициента усиления составило  $G_{и.а}^{Б.З} = 48,6$  дБ. Погрешность определения коэффициента усиления по полю в ближней зоне оценивалась величиной порядка  $\Delta G_{и.а} \sim \pm 0,8$  дБ и состояла в основном из погрешности измерения коэффициента усиления зонда  $\Delta G_z \sim \pm 0,5$  дБ и погрешности определения коэффициента передачи мощности между зондом и облучателем антенны  $\Delta K_{\eta} \sim \pm 0,3$  дБ. При измерениях по дискретным радиоисточникам коэффициент усиления антенны составил величину  $G_{и.а}^{Р.а} = 48,4$  дБ.

В целом, сравнение результатов, полученных двумя независимыми методами, подтвердило эффективность разработанной на стенде методики измерений и обработки данных полей в ближней зоне для определения характеристик испытываемых антенн.

#### 5.4. Экспериментальное исследование погрешностей алгоритма обработки

При измерении характеристик антенны амплифазометрическим методом на стенде НИРФИ проводился анализ погрешностей используемого алгоритма обработки. Необходимость экспериментальной проверки возможностей алгоритма в дополнение к модельным расчетам обусловлена тем, что реальное распределение поля антенны может значительно отличаться от модельного. Цель проводимых измерений заключалась также в определении возможностей обработки со сравнительно малым числом членов суммируемого ряда для расчета характеристик испытываемой антенны. При оценке погрешности алгоритма обработки использовались результаты "точного" вычисления преобразования Фурье измеренных данных, выполненного на ЭВМ БЭСМ-6.

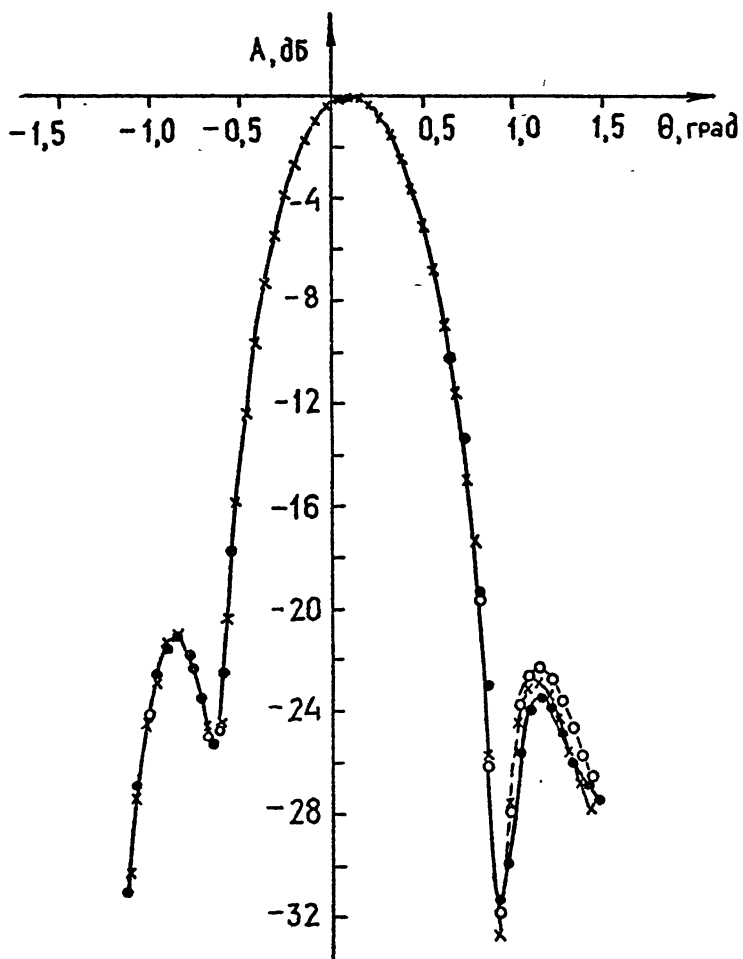
Проводилось сравнение параметров диаграмм направленности антенны, полученных при различной обработке одного исходного массива данных. На рис. 31 показано сечение диаграммы направленности, восстановленное с суммированием 25 и 100 членов ряда ( $N = M = 5$ , результат обозначен  $\text{---}\circ\text{---}$ ,  $N = M = 10$   $\text{---}\ast\text{---}$ ). При объеме исходного массива  $64 \times 125$  вычисление одного сечения диаграммы направленности (100 точек) заняло соответственно 48 и 80 минут. Отличие полученных параметров диаграммы направленности от результатов "точного" вычисления преобразования Фурье (показан сплошной линией) не превышает величин:

- координаты главного максимума  $\pm 1'$
- ширина главного лепестка  $\pm 1'$
- координаты первых боковых лепестков  $\pm 2'$
- уровень первых боковых лепестков  $\pm 0,6$  дБ для  $N, M = 10$   
 $\pm 1,5$  дБ для  $N, M = 5$

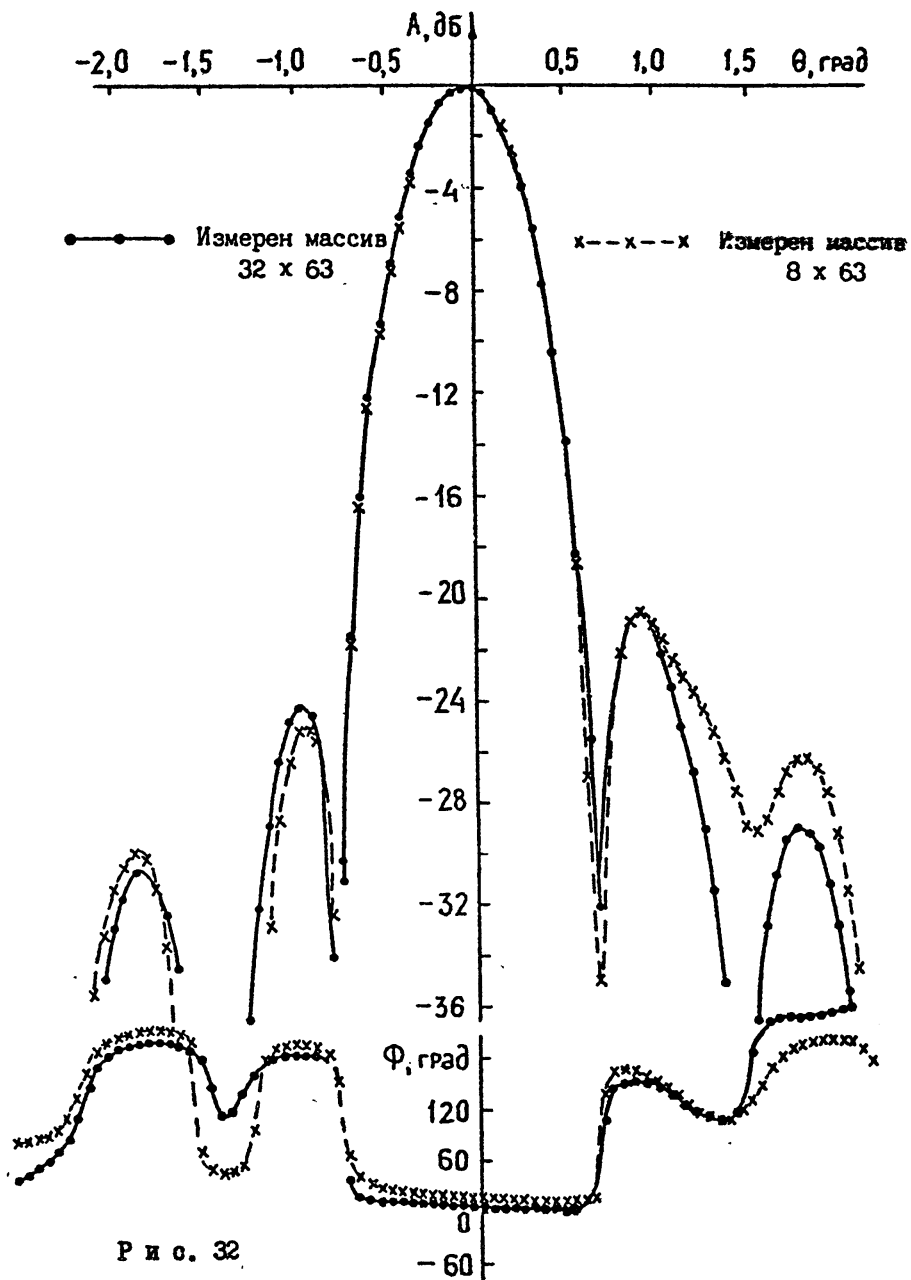
Проведенные измерения показали сохранение указанной точности при достаточно большой (примерно до  $30'$ ) разъюстировке испытуемой антенны.

С целью выяснения возможности сокращения времени измерений и обработки проводилось сравнение характеристик испытуемой антенны, полученных при различных размерах исходных массивов данных. На рис. 32 показано сравнение сечений диаграммы направленности, восстановленных по 32 и по 8 строкам измеренного поля ( $\Delta A_{\text{дант}} = 11,5$  и  $45^\circ$ ). При этом время измерений составило соответственно 16 и 5 минут, время обработки 16 и 10 минут. Как видно из приведенного рисунка, значения координат главного максимума различаются не более чем на  $2'$ , а уровни первых боковых лепестков не более чем на 1,0 дБ. Данный результат свидетельствует о возможности проведения оперативных измерений характеристик испытуемой антенны с достаточно высокой точностью.

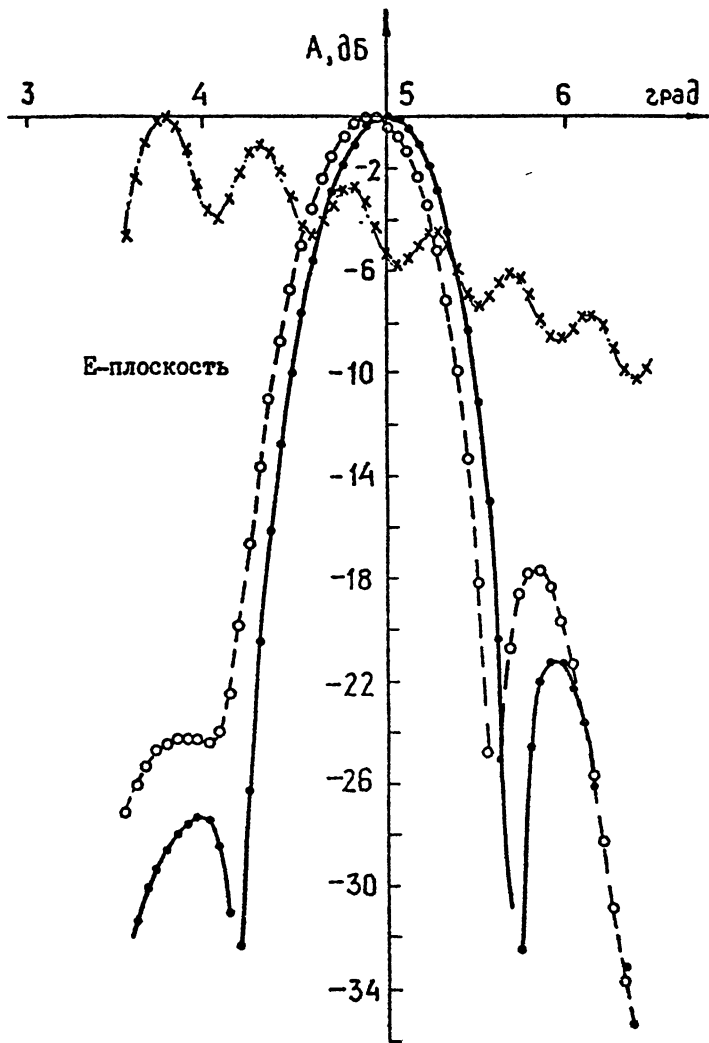
При исследовании особенностей восстановления параметров диаграммы направленности с отклоненным от оси лучом рассматривалась эффективность проведения фазовой коррекции измеренного поля с учетом предполагаемых значений координат главного максимума (см. /25/). На рис. 33 показано сечение диаграммы направленности антенны с лучем, отклоненным от оси на  $5^\circ$ . Обработка проводилась с суммированием первых ста членов ряда ( $N = M = 10$ ) как при проведении фазовой коррекции ( $\theta_0 = 5^\circ$ ,  $\varphi_0 = 0$ , результат обозначен  $\text{---}\circ\text{---}$



Р и с. 3I



Р и с. 32



Р и с. 33



—○—○— ), так и без нее (  $\theta_0 = 0$ ; —x—x—x— ). Для сравнения на рисунках показан сплошной линией результат "точного" преобразования Фурье измеренных данных.

Полученные результаты показали эффективность проведения фазовой коррекции при определении параметров лучей диаграммы направленности, отклоненных от нормали к плоскости сканирования. Однако, и при выполнении фазовой коррекции погрешность определения параметров диаграммы направленности оставалась довольно высокой, особенно в "наклоненном" сечении. Это связано, как отмечалось выше, с увеличением несимметрии измеряемого поля при наклоне луча. Для повышения точности определения параметров сильно отклоненных лучей диаграммы направленности необходима обработка с использованием большого числа (  $N, M$  ) членов суммируемого ряда.

Проведенные измерения позволили разделить и оценить вклад отдельных составляющих в общую погрешность измерения поля в ближней зоне антенны на стенде НИРФИ. Было определено, что основными причинами случайных составляющих ошибок являются колебания зонда при больших скоростях вращения стрелы сканера и нестабильности коэффициента усиления амплифазометра.

Точностные характеристики стенда НИРФИ на рабочей длине волны  $\lambda = 6$  см составили:

а) динамический диапазон измерения поля в ближней зоне антенны порядка 40 дБ; он ограничен как уровнем измеряемого сигнала, так и чувствительностью используемого амплифазометра;

б) случайная составляющая погрешности измерения амплитуды поля в ближней зоне антенны составляет  $\sigma_a \leq 1\%$  и обусловлена, в основном, погрешностью амплифазометра;

в) случайная составляющая погрешности измерения фазы поля в ближней зоне антенны составляет  $\sigma_\varphi \sim 0,8 \dots 3^\circ$  в зависимости от скорости вращения стрелы сканера; на малых (примерно до 4 об/мин) скоростях вращения стрелы ошибки измерения фазы поля связаны, в основном, с ошибками амплифазометра, при увеличении скорости вращения преобладающими становятся ошибки, вызванные колебаниями зонда; по дисперсии измеряемых значений фазы поля антенны среднеквадратичные отклонения зонда от плоскости сканирования оцениваются величинами  $\sigma_z \sim 0,1 \dots 0,5$  мм в зависимости от скорости вращения стрелы;

г) погрешность определения координат зонда в плоскости измере-

Таблица 3

Результаты оценок инструментальных составляющих погрешности определения параметров диаграммы направленности антенны на стенде НИРФИ амплифазометрическим методом при скорости вращения стрелы сканера 4 об/мин

Определяемый параметр диаграммы направленности	Погрешности измерения фазы $\phi_{\varphi} \approx 1,3$ град.	Источники погрешности Составляющая позиционной погрешности в плоскости сканирования $\Delta \alpha \leq 10$ мм
<p>Погрешность определения направления главного максимума, отнесенная к ширине главного лепестка по уровню <math>0,5 \phi_0 / \theta_{0,5}</math></p> <p>или относительная погрешность определения ширины главного лепестка <math>\phi_{1\varphi} /  \varphi _k</math></p> <p>Относительная погрешность определения уровней боковых лепестков</p> <p>1-й боковой лепесток ( <math>k = 1</math> )</p> <p>3-й боковой лепесток ( <math>k = 3</math> )</p>	$\frac{\phi_0}{\theta_{0,5}} \approx \frac{\phi_{0,5}}{\theta_{0,5}} \approx 0,8\%$ <p>при <math>\theta_{0,5} \sim 30' (\lambda = 6 \text{ см})</math></p> $\approx \begin{cases} (k = 1) 0,25 \text{ дБ} \\ (k = 3) 0,4 \text{ дБ} \end{cases}$	$\frac{\Delta \theta_{0,5}}{\theta_{0,5}} \leq 0,05\%$ <p>при <math>\theta_{0,5} \sim 30' (\lambda = 6 \text{ см})</math></p> $\approx \begin{cases} (k = 1) 0,02 \text{ дБ} \\ (k = 3) 0,05 \text{ дБ} \end{cases}$

ний составляет  $\Delta x \approx \pm 10$  мм и связана, в основном, с погрешностью редукторов опорно-поворотных устройств стенда, а также с ошибками системы автоматического управления антенной.

По полученным точностным характеристикам и известным соотношениям (см. /1/) были оценены инструментальные составляющие погрешности определения параметров диаграммы направленности антенны на стенде НИРФИ амплифазометрическим методом. Результаты оценок для скорости вращения стрелы сканера  $\sim 4$  об/мин приведены в таблице 3.

Проведенные исследования позволили оценить погрешности измерения характеристик исследуемой антенны амплифазометрическим методом на стенде НИРФИ (для неотклоненного луча диаграммы направленности) следующими величинами:

- погрешность определения координат главного максимума диаграммы направленности составляет порядка  $\pm 1$  угл. мин и связана, в основном, с ошибками "привязки" систем координат опорно-поворотных устройств сканера и антенны;

- погрешность определения ширины главного максимума на уровне  $-3$  дБ и погрешность определения координат первых боковых лепестков - не более  $\pm 2$  угл. мин обусловлены ошибками "привязки" систем координат и погрешностями обработки;

- погрешность определения уровней первых боковых лепестков составляет от  $\pm 0,2$  до  $\pm 1,5$  дБ в зависимости от выбора режимов измерений и обработки. Приведенное минимальное значение погрешности обусловлено инструментальными ошибками измерения поля антенны и достигается при измерениях с дискретом перемещения зонда  $\Delta r \sim \lambda/2$  и  $\Delta \chi_{\varphi} \sim 3\lambda$  (для внешней окружности области сканирования) и при обработке с суммированием большого ( $N, M \sim 10$ ) числа членов ряда. При увеличении дискрета измерений до  $\Delta r \sim 2\lambda$  и  $\Delta \chi_{\varphi} \sim (10 \dots 50) \cdot \lambda$  и при уменьшении числа суммируемых членов ряда ( $N, M \sim 3 \dots 5$ ) погрешность определения уровня первых боковых лепестков возрастает до указанных величин;

- погрешность определения коэффициента усиления антенны по полю в ближней зоне оценивается величиной  $\pm 0,8$  дБ и состоит, в основном, из погрешностей измерения коэффициента усиления зонда и погрешности измерения коэффициента передачи мощности между зондом и облучателем антенны.

## Л и т е р а т у р а

1. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Щеголов К.С. Методы измерения характеристик антенн СВЧ/Под ред. Н.М.Цейтлина. - М.: Радио и связь, 1985.-368 с.
2. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Курочкин А.П., Усин В.А., Шифрин Я.С. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне/Под ред. Л.Д.Бахраха.-Л.: Наука, 1985.-272 с.
3. Джонсон Р.С., Экер Х.А., Холлис Дж.С. Определение диаграмм направленности антенн по результатам измерений в ближней зоне.- ТИИЭР, 1973.-Т.61, № 12.-С.5-37.
4. Yaghjian A.D. An overview of near-field antenna measurements. - IEEE trans., 1986, v.AP-34, N 1, p.30...45.
5. Ньюэлл А.К., Штубенраух К.Ф., Бейрд Р.К. Методы градуировки образцовых СВЧ антенн по коэффициенту усиления. - ТИИЭР, 1986.- Т.74, № 1.-С.145-148.
6. Grimm K.R. Antenna analysis by near-field measurements. - Microwave J., 1976, v.19, N 4, p.43...52.
7. Borowick J., Holley A.E., Lange W.L., Howard R.W., Gummings R.L. A near-field antenna measurement system. - IEEE Trans., 1983, v.IM-32, N 1, p.91...102.
8. Rahmat-Sami Y., Gatti M.S. Far-field patterns of spaceborne antennas from plane-polar near-field measurements. - IEEE Trans., 1985, v.AP-33, p.638...648.
9. Богомолов А.Ф., Букарев Н.В., Валенцев Г.Н., Кисанов Ю.А., Фейзулла Н.М., Соколов И.Ф. Космическая складная антенна. - В кн. Антенны/Под ред. А.А.Пистолькорса.-М.: Радио и связь, 1981, Вып. 29.-С.10-20.
10. Гряник М.В., Ломан В.И. Развертываемые зеркальные антенны зонтичного типа. - М.: Радио и связь, 1987.-72 с.
11. Азюкин А.В., Классен В.И. О направленных свойствах раскрывающихся зеркальных антенн. - Радиотехника и электроника, 1982, Т.27, № 8.-С.1519-1526.
12. Битушан Е.И., Саяпин С.Н., Драков А.А., Гатауллин В.Х., Ши-

- шов И.В., Логинов В.Д., Алтунин В.И., Трубников А.Г. Складная конструкция антенны радиотелескопа. - 1987. - 21 с. (Препринт/Институт космических исследований АН СССР: № 1243).
13. Алтунин В.И., Андриянов В.В., Битушан Е.И., Кузьмин О.А., Перлов А.И., Пригода Б.А., Чурилов Ю.И. Антенная система "Радиоастрон". - М. - 1987. - 33 с. (Препринт/Институт космических исследований АН СССР: № 1237).
14. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. - М.: Сов. радио, 1976. - 350 с.
15. Smith P. Measurement of the complete far-field pattern of large antennas by radio star sources. - IEEE Trans., 1966, v.AP-14, N 1, p.6...16.
16. Векслер Н.В., Калинин А.В., Коротков В.С., Турчин В.И. Измерение поляризационных и фазовых диаграмм направленности антенн и амплитудно-фазового распределения корреляционным методом с использованием внеземных источников радиоизлучения. - Изв. вузов Радиофизика, 1984. - Т.27, № 3. - С.341-349.
17. Калинин А.В., Белов Ю.И., Алтунин В.И. Радиотехнические испытания антенной системы космического радиотелескопа проекта "Радиоастрон". - М., 1987. - 27 с. (Препринт/Институт космических исследований АН СССР: № 1244).
18. Белов Ю.И., Бахарев Н.В., Дивакова Е.К., Калинин А.В. и др. Стенд для амплифазометрических и радиоастрономических измерений параметров зеркальных антенн. - Тезисы докладов III Всесоюзной конференции "Метрологическое обеспечение антенных измерений", ВКАИ-3. Ереван, 1984. - С.191.
19. Снегирева В.В., Белов Ю.И., Дугин Н.А., Зорина О.А., Турчин В.И. Радиоастрономические методы измерения характеристик антенны (алгоритмы управления измерениями и вычисления характеристик). - Горький, 1985. - С.41-44 (Препринт/НИРФИ: № 192, 193).
20. Бахарев Н.В., Белов Ю.И., Корелов В.Т., Коротков В.С., Мосалов И.В., Турчин В.И., Фогель А.Л., Цейтлин Н.М. Сканирующее устройство измерителя волнового поля. - Авторское свидетельство № 1123383 (СССР) с приоритетом от 01.02.82. Оpubл. в БИ № 15, 1987.

21. Калинин А.В., Шмонин И.А. Метод коррекции поперечных отклонений зонда при измерениях ближнего поля антенн на плоскости. - Горький 1984. - 21 с. (Препринт/НИРФИ: № 178).
22. Красильникова Л.М., Серкин А.Г., Кнафель А.И. Система автоматического управления антенной РТН-7. - Тезисы докладов ВКАИ-3. - Ереван, 1984.-С.112-113.
23. Калашникова Н.А., Серкин А.Г. Организация обмена данными в автоматизированном стенде для амплифазометрических и радиоастрономических измерений параметров антенн. - Тезисы докладов ВКАИ-3. -Ереван, 1984.-С.193-194.
24. Антонец М.А., Белов Ю.И., Зорина О.А., Снегирева В.В. Разработка математического обеспечения и его сопровождение для радиоастрономических методов измерений параметров антенны.-Тезисы докладов ВКАИ-3. - Ереван, 1984.-С.46-47.
25. Белов Ю.И., Калинин А.В., Калинина Е.Е. Использование ряда Якоби-Бесселя при обработке данных поля в ближней зоне антенны, измеренных в узлах квазирадиальной решетки. - Изв. вузов, Радиофизика, 1987.-Т.30, № 10.-С.1286-1288.
26. Galindo-Israel V., Mittra R. A new series representation for the radiation integral with application to reflector antennas. - IEEE Trans., 1977, v.AP-25, N 5, p.631...641.
27. Rahmat-Samii Y., Galindo-Israel V., Mittra R. A plane-polar approach for far-field construction from near-field measurements. - IEEE Trans., 1980, v.AP-28, N 2, p.216...230.
28. Калинин А.В., Турчин В.И. Способ определения пространственного распределения электромагнитного поля в ближней зоне антенны. -Авторское свидетельство № 1376048 (СССР),опубл. в БИ № 7, 1988.-С.190.
29. Калинин А.В. Многочастотный способ определения поля в ближней зоне антенны.-Изв. вузов, Радиофизика, 1986.-Т.31, № 4, С. (См. также Препринт/НИРФИ: № 222, Горький, 1986.-35 с.).
30. ГОСТ 8.309-78. Методика выполнения измерений для определения параметров антенн по полю в раскрыве.-М.: Изд. стандартов, 1978.-11 с.

31. Каплун И.В., Курочкин А.П. Исследование случайных погрешностей голографических методов определения характеристик направленности антенн. - Радиотехника и электроника, 1975.-Т.20, № 10, С.2038-2045.
32. Арабаджи В.В., Белов Ю.И., Кнафель А.И. О погрешностях восстановления диаграммы направленности, вызванных ошибками измерений при сканировании ближнего поля. - Изв. вузов, Радиофизика, 1981.-Т.24, № 3.-С.349-357.
33. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.- М.: Мир, 1974.-463 с.

Дата поступления статьи  
25 апреля 1989 года