

УДК 522.2 : 523.164

## СИСТЕМА АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА НИРФИ ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

*В. С. Беагон, Н. А. Дугин, А. А. Романычев, Л. Р. Семенова,  
В. И. Турчин, Н. М. Цейтлин*

Рассматривается система апертурного суперсинтеза НИРФИ дециметрового диапазона, введенная в действие в 1979 году на РАС НИРФИ «Ст. Пустынь». Система состоит из двух 7-метровых параболических антенн, разнесенных на 417 метров по линии восток — запад (рабочая частота 540 МГц). Приводятся общее описание приемной аппаратуры, результаты первых экспериментальных исследований характеристик инструмента, проведенных радиоастрономическими методами, и некоторые результаты радиоастрономических исследований.

Метод апертурного синтеза начал применяться в радиоастрономии примерно с середины 50-х годов, и к настоящему времени введены в действие несколько крупных инструментов в различных странах мира (обзор систем апертурного синтеза можно найти, например, в [1]). В отечественной радиоастрономической технике инструменты апертурного синтеза пока не получили достаточно широкого распространения (особенно это касается систем последовательного синтеза), хотя их применение дает существенные преимущества не только для решения задач радиоастрономии, но и для ряда прикладных проблем.

В 1970 году в НИРФИ были начаты работы по созданию системы апертурного синтеза дециметрового диапазона, первый элемент которой — двухантенный  $d=7$  м) интерферометр с фиксированной базой 417 метров на волне 56 см, использующий вращение Земли (суперсинтез), был введен в действие в октябре 1979 г. Очевидно, что двухэлементный интерферометр с неподвижными антеннами является простейшим вариантом системы апертурного синтеза, но работа на таком инструменте позволяет в полной мере оценить объем необходимых подготовительных исследований, возможности решения тех или иных задач методами апертурного синтеза, состав и качество аппаратуры и проводить экспериментальную проверку отдельных элементов многоэлементной системы апертурного синтеза.

Результаты проведенных исследований были опубликованы в работах [2–10, 13]. Основными этапами создания инструмента являлись:

1) разработка и создание приемной аппаратуры, основные элементы которой описаны в [4];

2) создание и исследование линий связи и системы фазовой калибровки; в работе [2] приводятся результаты исследований влияния температурных колебаний внешней среды на электрические длины трех марок отечественных кабелей при их различном расположении на трассе и результаты апробации системы фазовой калибровки, аналогичной [11];

3) автоматизация измерений на основе микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28»; разработка методик измерений и пакетов программ записи и первичной обработки информации с учетом влияния аппаратурных эф-

фектов [3, 6] и обработки результатов измерений для различных режимов работы [7, 8] на ЭВМ «ДЗ-28» и «БЭСМ-6»;

4) развитие и разработка методов определения параметров базы интерферометра по излучению внеземных источников на основе конкретных требований к создаваемой системе апертурного синтеза; введение инструмента в действие и получение на нем первых результатов с целью определения его возможностей и оценки работоспособности [4-6].

Кроме этого, большое внимание уделялось разработке методов контроля приемных антенн как элементов трактов интерферометра [6], а также рассмотрению характеристик направленности созданной системы апертурного суперсинтеза и перспективного варианта ее развития (на основе третьей подвижной антенны или многоэлементной системы) [9, 10].

В процессе эксплуатации созданной системы апертурного синтеза в 1980—81 гг. были проведены некоторые изменения и усовершенствования отдельных блоков приемной аппаратуры, общее описание которой дается ниже. В данной статье приводятся также результаты основных экспериментальных работ, проведенных при контрольной проверке работоспособности инструмента, и в заключение рассматриваются перспективы развития созданной системы.

**1. Аппаратура.** Аппаратурный комплекс системы апертурного синтеза включает в себя корреляционный приемник с  $\sin$ - и  $\cos$ -каналами, систему встроенной фазовой калибровки, переменную линию задержки и управляющий вычислительный комплекс.

Приемная система — это супергетеродинный приемник с двойным преобразованием частоты, выполненный по так называемой схеме смешанного типа [12]. Первое преобразование в таком приемнике однополосное (SSB) — один из боковых каналов приема подавлен фильтром, второе — двухполосное, оба канала приема сохранены (DSB). Сочетание первого однополосного и второго двухполосного преобразований позволяет использовать различные положительные качества двух способов приема, такие, например, как простоту разделения на  $\sin$ - и  $\cos$ -каналы, возможность многократного использования кабелей ПЧ (SSB-приемник), независи-

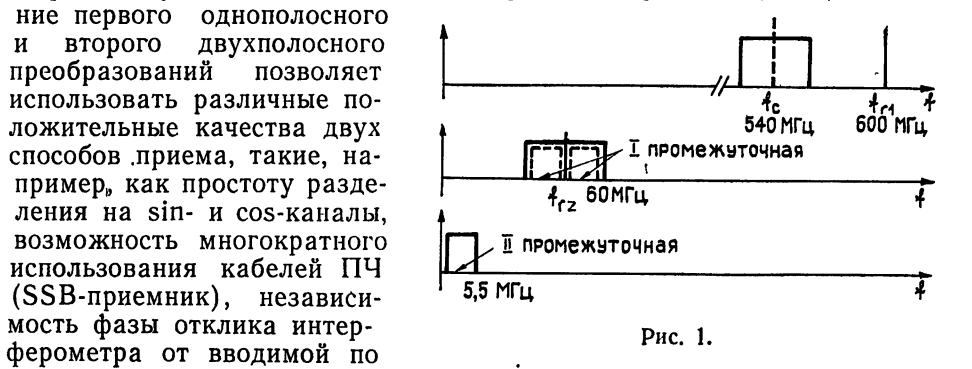


Рис. 1.

мость фазы отклика интерферометра от вводимой по промежуточной частоте задержки (DSB). Неточность компенсации задержки пространственного запаздывания сигнала отражается лишь на амплитуде выходного сигнала. Это обстоятельство позволяет вводить задержку ступенями, не кратными  $\lambda_{\text{пр}}$ . Отметим еще одну особенность интерферометра с DSB-приемником (равно как и с SSB — DSB-приемником) — возможность преобразования спектра принимаемого сигнала в область видеочастот с наименьшим из возможных средним значением  $\omega_{\text{пр}}$ , численно равным  $\Delta\omega/2$ . Это облегчает реализацию коррелятора (перемножителя) и дискретной линии задержки. На рис. 1 приведен порядок преобразования спектра принимаемого сигнала в SSB — DSB-системе, на рис. 2 — блок-схема аппаратного комплекса (1 — антенные коммутаторы, 2 — выносные блоки высокой частоты, 3 — контроллер, 4 — амплифазометр, 5 — блок временной задержки, 6 — блок сопряжения с микро-ЭВМ, 7 — микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28», 8 —

регистрирующее устройство «Консул», 9—синхронизатор Ч7-15, 10—блок управления режимом работы интерферометра, 11—синхронизированный гетеродин  $f_g = 600 \text{ МГц}$ , 12—делитель мощности 3 дБ, 13—блок калибровки интерферометра).

Однополосная часть приемной системы — выносные блоки высокой частоты (БВЧ). БВЧ располагаются непосредственно на антеннах или в технологических зданиях радиотелескопов. Они осуществляют усиление принятых сигналов, понижение частоты до требуемой промежуточной

и согласование с кабельными линиями связи (тип кабеля РК75-17-31). Селекция принимаемого сигнала осуществляется полосковыми фильтрами на встречных стержнях, а в качестве усилителей высокой частоты используются стандартные широкополосные транзисторные усилители с коэффициентом шума  $\sim 3 \text{ дБ}$  и усилением порядка 25—27 дБ. Балансный смеситель и предварительный усилитель промежуточной частоты (ПУПЧ) аналогичны применяемым в приборах П5-9 и П5-16. Центральная частота и полоса пропускания ПУПЧ равны 60 и 20 МГц соответственно ( $60 \pm 10 \text{ МГц}$ ).

В центральном пункте (на блок-схеме эта часть приемной системы обведена штрихпунктирной линией) размещены: первый гетеродин, амплифазометр, являющийся двухполосной частью приемника, аппара-

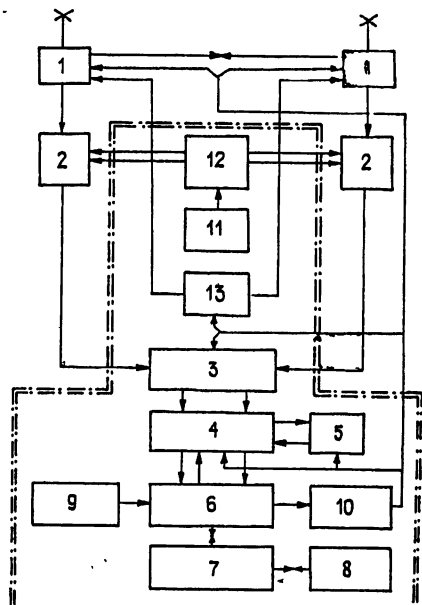


Рис. 2.

тура цифровой обработки и аппаратура управления режимом работы интерферометра, выполненная на базе микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28».

Основу амплифазометра составляет схема, предложенная в [13]. В этом приборе производится двухполосное преобразование, разделение на два канала, формирование амплитудно-частотной характеристики, модуляция фазы второго гетеродина ( $0 - \pi$ ) с частотой 1 кГц, перемножение сигналов и дальнейшая обработка в гетеродинных фильтрах.

Изменениям по сравнению с [13] подверглись входные устройства и модулируемый по фазе канал. Тракт первой ПЧ сделан общим, а разветвление для образования  $\sin$ -канала осуществляется при помощи делителя на дифференциальном трансформаторе непосредственно перед смесителем. Разветвление модулируемого канала на  $\sin$ - и  $\cos$ -перемножители производится после прохождения сигналом задержки. Таким образом, задержка становится общей и для  $\sin$ - и для  $\cos$ -каналов.

Выходными устройствами амплифазометра являются аналоговые перемножители и гетеродинные фильтры (ГФ), выполненные по схемам, аналогичным [14, 15].

Выходные аналоговые сигналы кодируются преобразователями аналог—код, в качестве которых используются цифровые вольтметры типа Ф210-1/1.

Дискретная линия задержки предназначена для восстановления когерентности сигналов на входах перемножителей. В отличие от [12], где применяются две задержки, отдельно для  $\sin$ - и  $\cos$ -каналов мы используем, как уже было сказано, одну общую задержку для обоих каналов. Изменение знака задержки (при переходе источника через мери-

диан) осуществляется перекоммутацией выходов антенн (соответствующих кабелей ПЧ). Тем самым задержка «переносится» из одной антенны в другую. Происходящее при этом изменение знака выходного сигнала перемножителей восстанавливается аппаратурным либо программным способом.

Задержка изготовлена из отрезков спирального кабеля РС400-7-12 и содержит девять двоичных разрядов. Младший разряд задержки составляет  $7 \text{ нс}$ , что обеспечивает уменьшение выходного сигнала из-за раскорреляции менее одного процента. Затухание задержки постоянно, не зависит от числа включенных разрядов и равно затуханию полностью включенной задержки. Неравномерность коэффициента передачи в полосе приемника в зависимости от комбинаций включенных разрядов не превышает трех процентов. Управление задержкой осуществляется автоматически от ЭВМ.

К общему гетеродину в системах апертурного синтеза предъявляются весьма жесткие требования: его частотная стабильность должна быть такова, чтобы не влиять на общую фазовую стабильность системы, и определяется соотношением между длиной волны гетеродина и длиной базы интерферометра. Для нашего случая относительная нестабильность частоты гетеродина должна быть не хуже  $10^{-6}$  за сеанс 10—12 часов. Удовлетворить этим требованиям может система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В качестве системы ФАПЧ использовался синхронизатор частоты Ч5-19. Эталоном генератором в системе синхронизации служил стандарт частоты Ч1-40. Синхронизируемым генератором (гетеродином) является генератор на металло-керамическом триоде ГС-4В и воздушно-полосковом резонаторе.

В качестве второго общего гетеродина (в двухполосной части приемной системы) используется кварцевый генератор  $f = 5 \text{ МГц}$  с последующим умножением до  $60 \text{ МГц}$ , поскольку частота второго гетеродина должна быть равна эффективному среднему значению полосы пропускания первой ПЧ. С блоком второго гетеродина совмещены делитель мощности и элементы, определяющие фазовые соотношения гетеродинных сигналов на входах вторых (DSB) смесителей, а также модулятор фазы ( $0 - \pi$ ).

Одной из основных задач при проектировании и реализации систем апертурного синтеза является обеспечение стабильной разности фаз плеч интерферометра. Существует много достаточно сложных технических решений этой задачи (см., например, [16, 17]). По существу эти решения сводятся к различного рода изоляции линий связи от воздействия окружающей среды и применению периодической фазовой калибровки. Нами были предприняты наиболее простые и доступные меры по изоляции линий связи от окружающей среды (линии связи заключены в металлические желоба с пенопластовым заполнением, сглаживающие влияние резких перепадов окружающей температуры) в сочетании с фазовой калибровкой, которая (при надлежащем выборе ее периодичности) позволяет поддерживать стабильной разность фаз плеч интерферометра с погрешностью  $2-3^\circ$ .

Прототипом схемы встроенной калибровки послужила система, применяемая в радиогелиографе в Кулгуре [11]. Использование шумового сигнала в качестве калибровочного весьма целесообразно, так как при этом измеряется интегральная разность фаз, соответствующая реальным АЧХ трактов интерферометра. Погрешность измерения разности фаз схемой встроенной калибровки определялась по фазовым сдвигам, вносимым по цепи первого гетеродина линией переменной длины, имеющей точный механизм перестройки и отсчета. Погрешность, определенная этим способом, оказалась заведомо меньше  $3^\circ$ . Блок-схема встроенной

фазовой калибровки приведена на рис. 3 (1 — переключатель поляризации, 2 — аттенюаторы 18 дБ, 3 — согласованные тройники, 4 — коаксиальный коммутатор, 5 — генератор шума, 6 — блоки высокой частоты, 7 — амплифазометр).

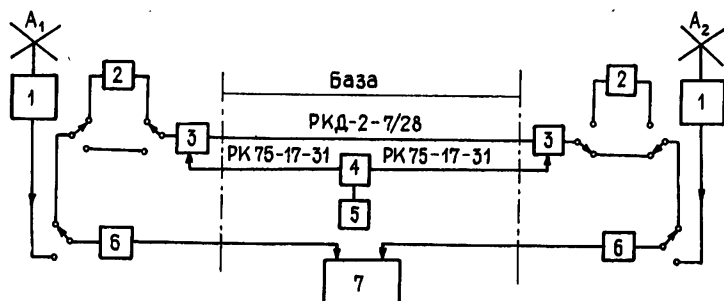


Рис. 3.

Управляющий вычислительный комплекс, разработанный на базе микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28», осуществляет: управление режимом работы интерферометра (калибровки, управление задержкой), накопление и предварительную обработку результатов измерений, вывод результатов на регистрирующее устройство («Консул»). Работа вычислительного комплекса синхронизируется синхронизмом Ч7-15, являющимся хранителем точного времени.

**2. Результаты первых исследований.** При вводе в действие интерферометра как элемента системы суперсинтеза первостепенной была задача определения вектора базы и неконтролируемой разности фаз антенных трактов. Решение ее позволяло более точно определить параметры инструмента, выявить возможные дефекты аппаратуры и других систем.

Рассматривались различные радиоастрономические методы определения базового расстояния интерферометров, т. е. методы, использующие радиоизлучение внеземных источников с известными координатами. Были развиты и практически реализованы методы измерений базы, применяемые в существующих системах апертурного синтеза, и разработаны новые способы калибровки, позволяющие проводить измерения по одному-двум источникам.

Основное уравнение для определения неизвестных параметров интерферометра (в нашем случае трех проекций базы  $X, Y, Z$  в декартовой системе координат и  $\Delta\varphi_{и}$  — разности электрических длин трактов, не учитываемой системой фазовой калибровки) имеет следующий вид:

$$\varphi_{ij} = \Delta\varphi_{и} + k_0 [\Delta L \sin \delta_j + \Delta M \cos \delta_j \cos t_i + \Delta N \cos \delta_j \sin t_i],$$

$$\Delta L = \Delta Z \sin \varphi_{ш} - \Delta X \cos \varphi_{ш},$$

$$\Delta M = \Delta Z \cos \varphi_{ш} + \Delta X \sin \varphi_{ш},$$

$$\Delta N = \Delta Y,$$

где  $\varphi_{ij}$  — разность фаз, измеряемая методом синхронного детектирования в ЭВМ интерференционных лепестков\* при часовом угле  $t_i$  по «точечному» источнику со склонением  $\delta_j$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  — ошибки задания соответствующих величин,  $\varphi_{ш}$  — широта места установки инструмента,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ . Зависимость  $\varphi_{ij}(t)$  («фазовая кривая») при наблюдении

\* В зарубежных изданиях употребляются названия «остановка фазы», «демодуляция интерференции» [17] и другие.

источника в течение суток представляет отрезок синусоиды «длиной» в один период, амплитуда которого и сдвиг относительно начала координат ( $t=0$ ,  $\varphi_{ij}=0$ ) определяются ошибками в задании величин исследуемых параметров.

Наиболее естественным путем выявления ошибок можно считать длительные (более полусуток) наблюдения источников. В этом случае параметры фазовой кривой определяются при аппроксимации массива измеренных значений  $\varphi_{ij}(t)$  синусоидальной функцией методом наименьших квадратов. Искомые величины могут быть найдены с высокой степенью точности при использовании нескольких источников с достаточно разнесенными склонениями, однако такие измерения занимают много времени. Поскольку в нашем случае не были проведены предварительные прецизионные геодезические измерения базы, этот способ наблюдений использовался для выявления грубых ошибок, а также для контроля работы системы в целом.

Одним из основных способов калибровки систем апертурного синтеза является нахождение неизвестных параметров решением системы линейных уравнений вида (1) методом наименьших квадратов при измерении  $\varphi_{ij}$  по нескольким источникам при различных часовых углах. Была проведена детальная практическая разработка данного метода и экспериментальная его проверка; полученные результаты принимались за эталонные — по ним проводилась оценка эффективности остальных рассмотренных методов калибровки базового расстояния.

С целью учета специфики использования малобазовых интерферометров с небольшой чувствительностью для калибровки базы нашего инструмента был разработан и применен метод, позволяющий находить четыре неизвестных параметра по одному-двум источникам. Измерения  $\varphi_{ij}$  в данном случае проводились в момент кульминации источника и при часовых углах, симметричных относительно кульминации. В этом случае из системы уравнений 4-го порядка можно было выделить  $Y$ -компоненту базы «восток—запад» и получить простые аналитические выражения для  $\Delta X$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta\varphi_{\Pi}$ , что позволило провести анализ ошибок измерений в зависимости от выбора калибровочных источников, выбрать оптимальные условия наблюдений для повышения точности измерений каждого из определяемых параметров. Для определения параметров базы использовались радиоисточники ЗС 273, ЗС 295, ЗС 147, ЗС 48, ЗС 196, ЗС 380, ЗС 286, которые можно было в нашем случае считать точечными. Величины их потоков на рабочей частоте 540 МГц лежат в пределах 20—50 единиц ( $Ян$ ), чувствительность интерферометра по потоку равнялась 50  $Ян$  (при постоянной времени 1 с), что потребовало для получения приемлемого отношения (сигнал/шум) времени накопления порядка 15 минут в одном замере  $\varphi_{ij}$ .

Проекция базы  $X$  и  $Z$  были определены с погрешностью 4—10 мм,  $Y$ -компонента — менее 2 мм, неконтролируемая разность фаз  $\Delta\varphi_{\Pi}$  — с погрешностью порядка 5°. Экспериментально была подтверждена возможность калибровки базы с высокой точностью по двум источникам: при использовании только источников ЗС 273 и ЗС 295 погрешности определения параметров методом понижения порядка системы уравнений превосходили погрешности основного метода не более чем в 1,5 раза.

Реализация разработанных методов калибровки базы обеспечила проведение ряда радиоастрономических исследований в основном с целью проверки возможностей инструмента, определения класса эффективно решаемых на нем задач и подготовки к усовершенствованию системы (созданию многоэлементного варианта).

Были проведены: а) относительные измерения потоков ряда «точечных» источников, б) исследования элементов структуры источников Кассиопея-А и Лебедь-А, в) исследования положений центра тяжести излучения источников Телец-А, Дева-А, 3С 123 и некоторых других, г) суперсинтез линейной апертуры за шестичасовой интервал времени для получения стрип-распределения радиояркости источников с нулевыми склонениями.

Результаты первых двух задач рассматривались в сравнении с известными данными как проверка точности и стабильности работы системы. Задача определения центра тяжести источников имела целью выявление объектов, которые для данного интерферометра можно считать симметричными и использовать для калибровки параметров базы. Погрешность определения центра тяжести излучения источника Дева-А была в пределах 3—8 угл. секунд.

С помощью суперсинтеза линейной апертуры были исследованы галактические области Н-II W 43 и W 44, имеющие склонения в пределах  $\pm 2^\circ$ , и получены стрип-распределения радиояркости по диску Солнца во время осеннего равноденствия (т. е. при  $\delta \approx 0$ ) 1981 года. Наблюдения слабых источников, имеющих достаточно изученную структуру, позволили отработать процедуру записи информации, оценить эффективность различных методов обработки данных на микро-ЭВМ и БЭСМ-6, апробировать различные способы дополнения недостающих значений спектра пространственных частот вблизи нуля. Измерения стрип-распределения радиояркости по диску Солнца были существенны для определения возможностей нашего инструмента. Очевидно, что использование Солнца как объекта для исследования методом суперсинтеза достаточно проблематично, так как из-за нестабильности интенсивности излучения и вращения Солнца вокруг своей оси за время синтезирования апертуры может измениться распределение радиояркости исследуемой области излучения. В то же время в нашем случае наблюдения Солнца имели существенное преимущество из-за мощного сигнала

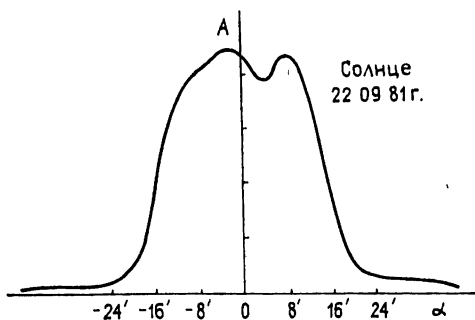


Рис. 4.

источника. Это обстоятельство позволяло провести калибровку интенсивности общего сигнала и коррекцию амплитуды для каждого замера, определить влияние рельефа местности на характеристики выходного сигнала и, следовательно, выявить пределы часовых углов источников, при которых искажения незначительны, или корректировать данные, полученные на пространственных частотах, близких к нулю. Кроме того, благодаря известному угловому диаметру Солнца, можно было с достаточной степенью точности восстанавливать спектр нулевых пространственных частот.

На рис. 4 приведен пример записи Солнца при относительно невысокой его активности в течение времени наблюдения. Результаты проведенных исследований позволили сделать вывод о достаточной информативности наблюдений Солнца системами апертурного синтеза с малыми приемными элементами.

В заключение отметим, что разработка и пробная эксплуатация системы апертурного синтеза позволили накопить необходимый опыт создания подобных инструментов и работы на них и провести необходи-

мую подготовку для создания на базе этого радиотелескопа многоэлементной системы апертурного синтеза. Предполагается дополнить существующую систему еще тремя неэквидистантно расположенными 7-метровыми антеннами, реализующими при одновременной работе девять длин баз. В режиме суперсинтеза этот инструмент будет иметь разрешение, сравнимое с разрешением РАТАН-600, и чувствительность (при одинаковом времени накопления), лишь на порядок меньшую, чем у этого инструмента.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Цейтлин Н. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1983, 26, № 11, с. 1380.
2. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Турчин В. И. Препринт НИРФИ № 125. — Горький, 1979.
3. Дугин Н. А., Семенова Л. Р. Препринт НИРФИ № 137. — Горький, 1980.
4. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И., Цейтлин Н. М. Препринт НИРФИ № 143. — Горький, 1980.
5. Беагон В. С., Дугин Н. А., Романычев А. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И., Цейтлин Н. М. Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции. — Ереван, 1982, с. 234.
6. Дугин Н. А. Диссертация. Горький, 1982.
7. Дугин Н. А., Семенова Л. Р. Препринт НИРФИ № 166. — Горький, 1983.
8. Дугин Н. А., Семенова Л. Р., Турчин В. И. Препринт НИРФИ № 174. — Горький, 1983.
9. Дугин Н. А., Турчин В. И., Шаронов Г. А., Цейтлин Н. М. — Радиотехника и электроника, 1971, 16, № 6, с. 918.
10. Дугин Н. А., Турчин В. И., Шаронов Г. А. — Радиотехника и электроника, 1971, 16, № 7, с. 1152.
11. Morimoto M. — Electron. Letters, 1965, 1, № 7, p. 192.
12. Wesseling K. H. — IEEE Trans. Ant. Prop., 1967, AP-15, № 2, p. 332.
13. Засухин В. Ф., Романычев А. А., Романычев Ю. Н., Титов Г. К. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 7, с. 949.
14. Фрейтер Р. Г. — Приборы для научных исследований, 1964, 35, № 7.
15. Фрейтер Р. Г. — Приборы для научных исследований, 1965, 36, № 5.
16. Брейсуэлл, Колвин и др. — ТИИЭР, 1973, 61, № 9, с. 103.
17. Баарс, Ван дер Брюгге и др. — ТИИЭР, 1973, 61, № 9, с. 115.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

#### APERTURE SYNTHESIS SYSTEM OF NIRFI AT DECIMETER WAVELENGTH

*V. S. Beagon, N. A. Dugin, A. A. Romanychev, L. R. Semenova,  
V. I. Turchin, N. M. Tseitlin*

An aperture synthesis system is considered in DM wavelength which is located at radioastronomical station «Staraya Pustyn» of NIRFI (Radiophysical Research Institute) in 1979. The system consists of two immovable 7-m aeriels with 417-m base distance and east-west orientation (the operating frequency is 540 MHz). The receiver devices, the results of the first experimental investigations of the instrument characteristics carried out by radioastronomical methods and some results of radioastronomical observations are given.