

УДК 621.396 628 : 523.164

**АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС МАЛОБАЗОВОГО
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
С КАБЕЛЬНЫМИ ЛИНИЯМИ СВЯЗИ
ДЛЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ**

В. А. Алексеев, А. Е. Крюков, Б. Н. Липатов, А. С. Сизов

Описывается аппаратурный комплекс радиоинтерферометра с кабельными линиями связи между антеннами, работающий в сантиметровом диапазоне длин волн и предназначенный для астрофизических исследований. Радиоинтерферометр измеряет модуль функции видимости радиоисточников. Управление частотой интерференции осуществляется путем перестройки частоты второго гетеродинного сигнала в каждом приемном пункте. В момент наблюдения радиоисточника проводится фурье-анализ интерференционного колебания в реальном масштабе времени со спектральным разрешением 0,01 Гц в стандартном режиме, соответствующем времени когерентного накопления сигнала 100 с. Интерференция сигналов может осуществляться в полосе частот 50 МГц и 500 кГц. Приводятся некоторые результаты экспериментальной проверки. Обсуждаются возможности работы представляемого радиоинтерферометрического комплекса при наличии помех.

На основе приемных систем астрометрического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) НИРФИ [1] разработан аппаратурный комплекс малобазового радиоинтерферометра сантиметрового диапазона длин волн с кабельными линиями связи между антennами, измеряющий модуль функции видимости радиоисточников. Учитывая, что к настоящему времени, в том числе в связи с развитием РСДБ, отработаны и с успехом применяются достаточно мощные методы получения радиоизображений источников только по амплитудным данным [2], представляемая система позволяет во многих случаях получать практически те же результаты, что и на традиционных сфазированных радиоинтерферометрах. Технически система значительно упрощается по сравнению с традиционной, так как не требуется обеспечения долговременной фазовой стабильности линий связи и не нужны фазовые калибровки системы, но в то же время она сохраняет большой потенциал по чувствительности.

Основные особенности описываемой системы радиоинтерферометра следующие. Во-первых, системы когерентного преобразования принимаемых сигналов от радиоисточника обеспечивают управление частотой интерференции путем введения с помощью синтезаторов частоты относительной частотной расстройки гетеродинных сигналов независимым образом в каждом приемном пункте. При этом все гетеродинные сигналы формируются от одного опорного сигнала стандарта частоты, что позволяет оптимально выбирать частоту интерференции при наблюдениях. Во-вторых, в момент наблюдения радиоисточника проводится фурье-анализ интерференционного колебания в реальном масштабе времени. Радиоинтерферометр имеет два режима работы: с полосой принимаемых и участвующих в интерференции сигналов 50 МГц в первом и 500 кГц во втором режимах. Спектральное разрешение фурье-

анализа интерференционного колебания в стандартном режиме составляет $0,01 \text{ Гц}$, что соответствует времени когерентного накопления полезного сигнала в 100 с . Дальнейшее накопление сигнала осуществляется некогерентным образом.

Предлагаемый аппаратурный комплекс радиоинтерферометра может использоваться также для измерения потоков мощности от радиоисточников, которые можно считать точечными для конкретной базы, здесь возможно достижение очень большого времени накопления.

1. Структура и принципы построения аппаратурного комплекса радиоинтерферометра. Аппаратурный комплекс радиоинтерферометра сантиметрового диапазона состоит из систем когерентного преобразования частоты, широкополосного аналогового коррелятора с перестраиваемой линией задержки, узкополосного знакового коррелятора и системы фурье-анализа интерференционного колебания в реальном масштабе времени. Структурная схема аппаратурного комплекса радиоинтерферометра приведена на рис. 1. Принятый антенными сигнал от радиоисточника с помощью систем когерентного преобразования из сантиметрового диапазона переносится в полосу частот $28\text{--}78 \text{ МГц}$ — рабочий интервал частот аналогового широкополосного коррелятора АШК. Система когерентного преобразования сигнала, в которую входят устройства формирования сигналов первого и второго гетеродинов, соответствующие смесители частот и усилители промежуточных частот, идентична подобной системе астрометрического РСДБ НИРФИ [1] и более подробно описана в [3], поэтому здесь сделаем только краткие пояснения.

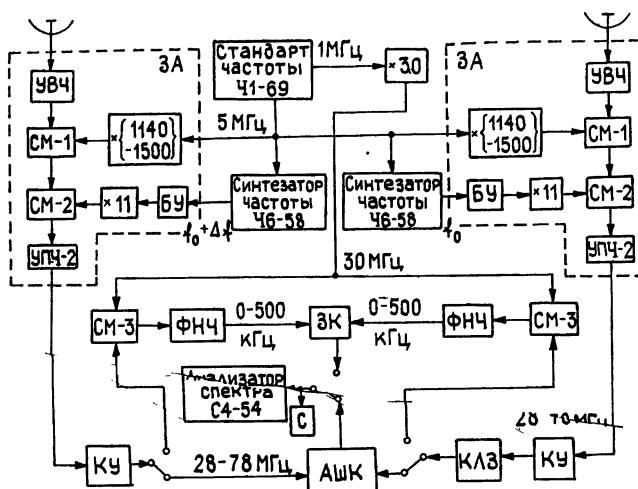


Рис. 1. Структурная схема аппаратурного комплекса радиоинтерферометра сантиметрового диапазона: $f_0 = 45,454545 \text{ МГц}$, С — самописец. Аппарата 3А располагается в зеркалах антены, остальная — в аппаратурной комнате.

Сигналы первых гетеродинов, частоты которых фиксированы и одинаковы в обоих пунктах и могут выбираться любыми в пределах $5700\text{--}7500 \text{ МГц}$ с дискретом в 300 МГц , формируются из опорного сигнала рубидиевого стандарта частоты 5 МГц путем умножения по частоте. Сигналы вторых гетеродинов, частоты которых находятся в области 500 МГц , образуются в каждом пункте после умножения на $n = 11$ сигналов с частотами соответственно f_0 и $f_0 + \Delta f$, где $f_0 = 45,454545 \text{ МГц}$, поступающих с выходов синтезаторов частоты Ч6-58,

которые, в свою очередь, засинхронизированы сигналом 5 МГц того же стандарта частоты. Таким образом, хотя частоты вторых гетеродинов и отличаются в разных пунктах радиоинтерферометра на величину $n\Delta f$, взаимные фазовые соотношения между принятыми и преобразованными сигналами каждого пункта детерминированы, так как формирование всех гетеродинных сигналов идет из опорной частоты 5 МГц одного рубидиевого стандарта. В системе радиоинтерферометра с кабельной связью величина введенной частотной расстройки $n\Delta f$ в сумме с дифференциальным доплеровским сдвигом частоты f_d , определяемым частотой принимаемого радиоизлучения и геометрией вращающейся системы «база интерферометра — положение радиоисточника», однозначно характеризует частоту интерференции f_i выходного интерференционного колебания. О выборе на момент наблюдения радиоисточника номинального значения частоты интерференции, который осуществляется с помощью частотной расстройки Δf в синтезаторах частоты, мы остановимся ниже.

В целях повышения стабильности работы системы выходной сигнал синтезатора, прежде чем поступить на умножитель частоты на одиннадцать, проходит через узкополосный буферный усилитель БУ. Энергетическая полоса частот принимаемых сигналов 50 МГц формируется фильтром на первой промежуточной частоте со средней частотой ~ 450 МГц. После преобразования на вторую промежуточную частоту информативные сигналы в полосе частот 28—78 МГц усиливаются в УПЧ-2 и поступают по соединительным кабелям на корреляционную обработку.

В связи с тем, что частотный диапазон преобразованного информативного сигнала занимает полосу более октавы, при распространении по длинным (несколько сотен метров) кабелям связи происходит искажение его спектра вследствие увеличения величины затухания с ростом частоты, возникают и нелинейные искажения разности фазовых характеристик из-за различных в общем случае длин соединительных кабелей от обоих приемных пунктов. Это приводит к декорреляции широкополосных сигналов и развалу корреляционной функции. Поэтому при разработке широкополосного радиоинтерферометра возникает задача устранения амплитудно-фазовых искажений в сигнале, обусловленных распространением в длинных трактах связи, а также при прохождении через широкополосные усилители УПЧ-2. С этой целью усилители УПЧ-2 для обоих пунктов изготавливаются с близкими характеристиками, а информативные сигналы после прохождения ~~по кабелям~~ связи, прежде чем поступить в коррелятор, ~~проходят~~ через корректирующие усилители КУ. ~~Объективную~~ ~~причины~~ то, что линия связи не приводит к развалу корреляционной функции, дает контроль за прохождением по линии связи с корректором на выходе короткого импульса, длительность которого не превышает времени корреляции широкополосного сигнала, т. е. в нашем случае ≤ 20 нс. Равенство длительностей входного импульса и на выходе линии с корректором свидетельствует о линейности фазовой характеристики.

Кроме фазовых коррекций, которые фактически выравнивают фазовые скорости распространения разных спектральных составляющих информативного сигнала, в радиоинтерферометре проводится компенсация групповой задержки t информативного сигнала, причем ошибка компенсации существенно меньше времени корреляции. Этой цели служит блок кабельных линий задержек КЛЗ на основе набора кабелей, которые позволяют при соответствующем подключении получить любую задержку с дискретом в 1 нс в пределах от 0 до 1023 нс. В длинных кусках кабелей линии задержки осуществляется амплитудно-фазовая коррекция.

Корреляционная обработка в нашем радиоинтерферометре может происходить в двух вариантах: В первом варианте она выполняется с помощью аналогового широкополосного коррелятора АШК, интервал рабочих частот которого 28—78 МГц, а во втором варианте — с помощью знакового коррелятора ЗК на видеочастоте в полосе 500 кГц и осуществляется после третьего преобразования частоты.

Упрощенную схему аналогового широкополосного коррелятора показана на рис. 2. Сигналы второй промежуточной частоты поступают на входы двух идентичных, широкополосных транзисторных усилителей. Затем усиленные сигналы суммируются на сопротивлении R_1 , и результат смешивается на диоде. Далее в интеграторе производится первичное накопление информации за время T_1 , определяемое величинами R и C , длительность которого берется из условия $T_1 \ll 1/f_i$. С помощью переключателя Π выбирается режим работы радиоинтерферометра. В положении «1» емкостью фильтруется постоянная составляющая сигнала и реализуется мультиплексивный режим. В положении «2» к величине коррелированной мощности принятого радиоизлучения от источника добавляется величина полной принимаемой мощности и реализуется работа интерферометра в аддитивном режиме.

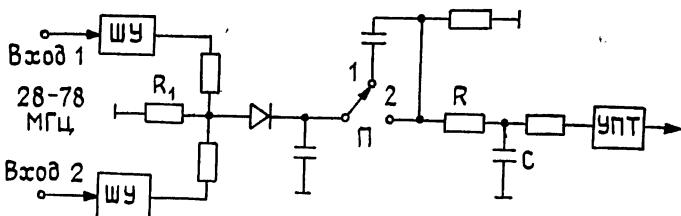


Рис. 2. Упрощенная схема аналогового широкополосного коррелятора: «ШУ» — широкополосные усилители, «УПТ» — усилитель постоянного тока.

Для обеспечения работы радиоинтерферометра в узкой полосе частот приема 500 кГц осуществляется третье преобразование частоты с помощью гетеродинов, сигналы которых в каждом плече интерферометра одинаковы по частоте и равны 30 МГц и сформированы из опорной частоты стандарта путем умножения. Видеосигналы поступают на входы знакового коррелятора, состоящего из двух независимых усилителей-ограничителей, знакового перемножителя и интегратора также с постоянной времени T_1 . В узкой полосе частот радиоинтерферометр работает только в мультиплексивном режиме.

Интерференционное колебание с выходов обоих корреляторов поступает на регистрацию на ленте самописца и одновременно на низкочастотный спектр-анализатор С4-54. В этом спектре-анализаторе в реальном масштабе времени осуществляется фурье-анализ интерференционного колебания со спектральным разрешением в стандартном режиме в 0,01 Гц, что соответствует времени когерентного накопления полезного сигнала в 100 с. Фурье-анализ проводится в полосе 0—2 Гц. Результирующий амплитудный спектр выходного интерференционного колебания фотографируется с экрана анализатора или может быть последовательно выведен на другой регистратор после опроса всех двухсот каналов анализатора спектра. Значение частоты интерференции f_i путем установки на синтезаторах частоты расстройки Δf подбирается так, чтобы она входила в полосу фурье-анализа, и обычно находится в районе 1—1,5 Гц. Благодаря тому, что спектральная линия интерференционного колебания в нашей системе может находиться достаточно далеко от области нулевых частот независимо от геометрии врачаю-

щейся системы «база — радиоисточник», . влияние всевозможных медленных дрейфов и аппаратурных нестабильностей в системе на полезный сигнал в значительной степени ослабляется. Поэтому в результирующем спектре шумы в области номинальной частоты интерференции, характеризующие чувствительность радиоинтерферометра по потоку, определяются практически только уровнем температуры шумов на входе приемных систем вместе с антенным вкладом и величиной корреляционного выигрыша. Это обстоятельство позволяет эффективно проводить длительное накопление сигнала: как когерентное, так и некогерентное.

В нашем радиоинтерферометре при использовании фурье-анализа интерференционного колебания в реальном масштабе времени со стандартным временем когерентного накопления 100 с реализуется корреляционный выигрыш для первого варианта при полосе приема $50 \text{ МГц} \sim \sqrt{7} \cdot 10^4$ и для второго варианта при полосе $500 \text{ кГц} \sim 4,5 \cdot 10^3$. Последняя оценка дана с учетом потери в $\pi/2$ раз, возникающей из-за ограничения сигналов по амплитуде в знаковом корреляторе [4] при малом уровне полезного сигнала по сравнению с шумами на входе.

Интервал времени когерентного накопления полезного сигнала в нашей системе ограничен возможностями спектра-анализатора С4-54 и составляет величину 100 с при полосе анализа 2 Гц. При меньшей полосе анализа время когерентного накопления может быть увеличено на практике до пределов, накладываемых, во-первых, изменениями геометрии врачающейся системы «база — радиоисточник», т. е. когерентное накопление будет возможно до тех пор, пока отклик радиоинтерферометра находится в одном и том же фильтре фурье-анализа, ширина которого обратно пропорциональна времени когерентного накопления, и, во-вторых, временем, в течение которого линия связи фазостабильна.

Некогерентное усреднение N спектров выходного интерференционного колебания по соответствующим точкам на оси частот f_i в каждом спектре с учетом меняющегося с течением времени доплеровского сдвига частот, вызывающего перемещение положения в частотных каналах спектральной линии интерференционного колебания, приведет к дальнейшему увеличению чувствительности радиоинтерферометра. Следует подчеркнуть, что каких-либо принципиальных ограничений аппаратурного характера на число усредняемых спектров и связанного с этим общим временем накопления в предлагаемой радиоинтерферометрической системе нет, фазовой стабильности линий связи между антеннами в течение этого времени не требуется.

Очень большие времена накопления сигнала особенно полезны при оценке коррелированной мощности радиоисточников, которые можно считать точечными для данной базы или близкими к тому, когда функция видимости постоянна или слабо зависит от часового угла наблюдаемого радиоисточника.

Отметим, что в системе может быть реализована интерференция сигналов в полосе частот несколько мегагерц при применении соответствующих фильтров с близкими характеристиками в диапазоне второй промежуточной частоты. Например, полоса 4 МГц осуществляется при использовании двух блоков из системы РСДБ на $\lambda \approx 30 \text{ см}$ [5], которые содержат фильтры с полосой пропускания в интервале частот 48—52 МГц, а их входы согласованы с выходами корректирующих усилителей.

2. Некоторые результаты проверки системы. Описанный радиоинтерферометрический аппаратурный комплекс проходил проверку как в лаборатории, так и на малой базе; при этом нами наблюдалось несколько радиоисточников. На рис. 3 приведена корреляционная функ-

ция $R(\tau)$, полученная в лабораторных условиях при работе радиоинтерферометра в широкополосном варианте с полосой приема 50 МГц. На оба входа радиоинтерферометра подавался один и тот же достаточно мощный шумовой сигнал. Аппаратурный комплекс работал в режиме аддитивного радиоинтерферометра, где имеется простая и точная возможность оценки коррелированной мощности относительно полной мощности сигнала, поступающего на входы, и который в нашем случае был полностью коррелированным. Ширина корреляционной функции, показанной на рисунке, составляет ~ 20 нс на уровне 0,5 и соответствует полосе приема. Нормированное значение корреляционной функции в максимуме, равное 0,96, и форма корреляционной функции свидетельствуют о незначительных фазовых искажениях в системе, приводящих к потере 0,04 доли коррелированной мощности.

На рис. 4 показан вид спектра интерференционного колебания от радиоисточника Лебедь-А, частично разрешенного для данной базы на том часовом угле, при котором он наблюдался. Полоса приема равнялась 50 МГц, время когерентного накопления $T_k = 40$ с. На рис. 5 приведен спектр интерференционного колебания от калибровочного радиоисточника DR-21. Полоса приема в этом случае была 500 кГц, а время когерентного накопления 100 с.

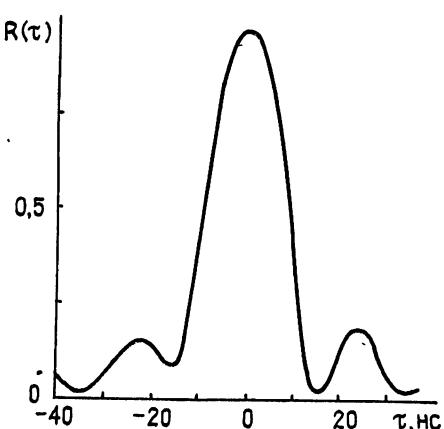


Рис. 3.

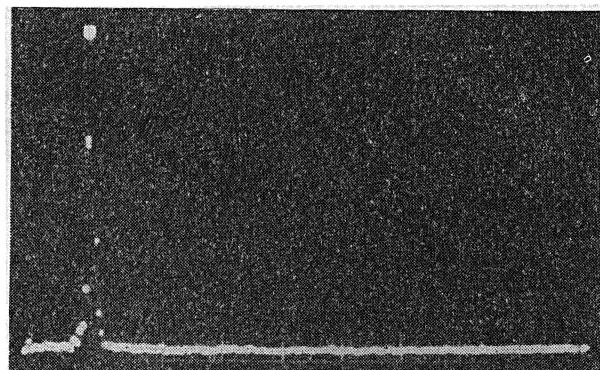


Рис. 4.

На рис. 6 продемонстрированы возможности накопления интерференционного сигнала от радиоисточника. В описываемом случае прием велся в узкой полосе частот 500 кГц. На рис. 6а показана фотография спектра интерференционного колебания от радиоисточника ЗС 273 при стандартном времени когерентного накопления 100 с, вследствие чего каждая точка на фотографии отстоит от соседней на 0,01 Гц. На рис. 6б приведен результат усреднения восемнадцати подобных спектров от того же радиоисточника, сфотографированных подряд последовательно во времени через каждые 100 с. Усреднение спектрограмм про-

водилось в окрестности ± 30 точек ($\pm 0,3 \text{ Гц}$) спектральной линии интерференционного колебания, полное время накопления информативного сигнала составило 1800 с.

Сделаем несколько замечаний относительно измерения амплитуды функции видимости V , отсчеты которой проводятся на разных часовых углах h изучаемого радиоисточника.

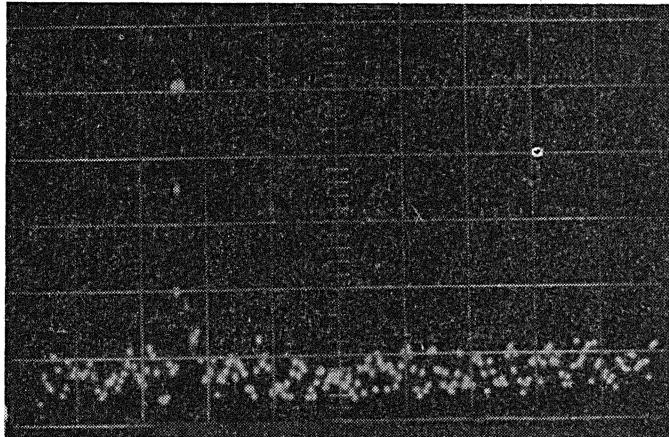
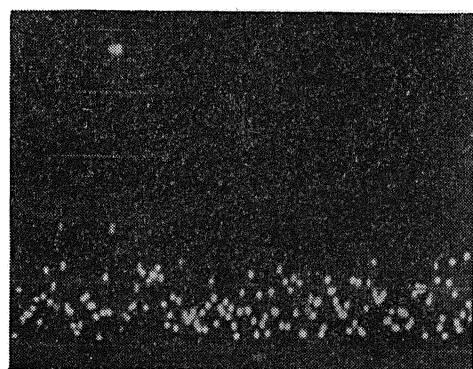
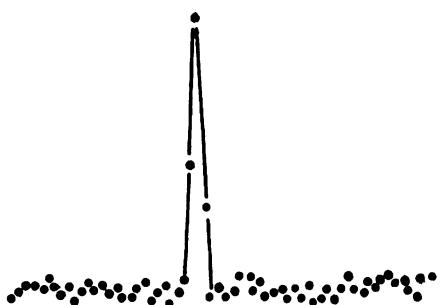


Рис. 5.

Стандартная процедура, применяющаяся при измерении $V(h)$ достаточно интенсивных источников с помощью описанного радиоинтерферометра, следующая. По калиброванным шумовым генераторам, имеющимся во входных трактах приемных систем, определяется прирост антенной температуры от исследуемого источника. Отношение этой величины к считающейся известной температуре шумов системы сравнивается с величиной коррелированной доли мощности радиоисточника, измеряемой на выходе спектра-анализатора. Точность метода ограничена, в основном, знанием шумов системы.



а)



б)

Рис. 6. Некогерентное накопление сигнала на примере радиоисточника ЗС 273. Полоса приема 500 кГц; а) $N = 1$, $T_k = 100$ с; б) $N = 18$, $T_h = 1800$ с. Время наблюдения 11 ч 45 мин — 12 ч 15 мин 10 декабря 1979 г.

При исследовании слабых радиоисточников, когда оценка общей принимаемой мощности затруднена, используется калибровочный радиоисточник с известным потоком, являющийся точечным для конкретной базы с $V_0(h) = 1$, относительно которого на разных часовых углах измеряется коррелированный поток по данным спектрограммы.

3. Работа радиоинтерферометрического комплекса при наличии помех. Отметим некоторые моменты работы описанного радиоинтерферометра при наличии аддитивной помехи на входе системы. Положение максимума выходного интерференционного отклика является в общем случае функцией задержки и частоты интерференции. Корреляционная огибающая принимаемого радиоизлучения, которую можно трактовать как диаграмму направленности широкополосного радиоинтерферометра по задержке (рис. 3), повышает помехоустойчивость системы, ослабляя такую же широкополосную коррелированную помеху при благоприятной геометрии на момент наблюдения. Если ширина спектра помехи намного уже полосы приема радиоинтерферометра, подавить таким образом помеху при малой базе невозможно в силу большого времени корреляции сигнала помехи. То же самое справедливо для работы малобазового радиоинтерферометра в узкополосном режиме.

С другой стороны, проведение в процессе наблюдения радиоисточника фурье-анализа выходного интерференционного колебания с высоким спектральным разрешением в реальном масштабе времени позволяет наблюдателю оперативно различать полезный сигнал от коррелированной помехи, причем, безразлично — импульсная помеха или непрерывная. Помеха может практически не влиять на измерение отклика интерферометра от радиоисточника, даже если отклик от помехи превышает полезный сигнал, так как спектральные линии интерференционных колебаний от помехи и радиоисточника в общем случае разнесены по оси частот f_i как при неподвижном, так и при движущемся источнике помех в связи с разной геометрией и кинематикой систем «база—источник помехи» и «база—радиоисточник», определяющих разные f_d . По существу это означает, что полезный сигнал и помеха находятся в разных частотных каналах спектра-анализатора, а положение откликов от радиоисточника и неподвижной помехи на оси f_i всегда точно известно наблюдателю, причем в целях помехозащищенности желательны наблюдения с возможно большим временем когерентного накопления для повышения спектрального разрешения фурье-анализа. Простота и удобство в описанном радиоинтерферометре оценки помеховой обстановки при наблюдениях способствуют выявлению вклада помехи в уровень шумов на входах приемных систем, что ведет к поправкам калибровок шумов системы и, следовательно, повышает точность измерения $V(h)$.

Подводя итог изложенному, можно рассматривать представленный аппаратурный комплекс двухэлементного радиоинтерферометра как перспективную основу при создании многоэлементной системы суперсинтеза с кабельными линиями связи между антеннами. При обработке информации, содержащей только амплитудные данные, могут использоваться методы подгонки [6], очистки [7] и максимальной энтропии [8] с их модификациями. Кроме того, такая многоэлементная система, дополненная спектром-анализатором на основе мини-ЭВМ или специализированного устройства, измеряющим комплексный спектр интерференционного колебания, позволит измерять относительную фазу функции видимости. Тогда наряду с перечисленными методами могут применяться предложенные для РСДБ методы опорного источника [9], многочастотного приема [10], замкнутой фазы [11]. Здесь также не нужно долговременной, больше времени когерентного накопления, фазовой стабильности приемных трактов и линий связи между антennами, относительная простота системы остается в силе. Преимущества предла-

гаемого подхода к проблеме представляются особенно важными для получения радиоизображений в коротковолновой части сантиметрового диапазона и на миллиметровых волнах.

Что касается измерения потоков мощности от точечных для данной базы радиоисточников, то уже представленный аппаратурный комплекс двухэлементного радиоинтерферометра обладает большим потенциалом по чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В. А., Антиленко А. А., Гатэлюк Э. Д., Дементьев А. Ф., Князев Н. А., Крюков А. Е., Липатов Б. Н., Матвеев Л. Г., Сизов А. С., Рат Р. Н. Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции. — Ереван, 1982, с. 414.
2. Построение изображений в астрономии по функциям когерентности. / Сб. под ред. К. Ван Схонвельда. — М.: Мир, 1982; Image Formation from Coherence Function in Astronomy.— Proc. of IAU coll. № 49, 10—12 august 1978./Ed. by C. Van Schooneveld, 1979, D. Reidel Publishing Co.
3. Липатов Б. Н., Сизов А. С. Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции. — Ереван, 1982, с. 419; Изв. вузов — Радиофизика (в печати).
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Сов. радио, 1966.
5. Липатов Б. Н., Сизов А. С. Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции. — Ереван, 1982, с. 416.
6. Bates R. H. T.— Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1969, 142, p. 413.
7. Högbom J. A.— Astron. and Astrophys., Suppl. Ser., 1974, 15, p. 417.
8. Vergnac S. J.— Radio Sci., 1977, 12, № 5, p. 831.
9. Парийский Ю. Н., Стоцкий А. А. Изв. ГАО АН ССР, 1972, № 188, с. 195.
10. Алексеев В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1969, 12, № 4, с. 487.
11. Rogers A. E. E., Hinterberger H. F., Whitney A. R., Counselman C. C., Shapiro I. I., Wittels J. J., Klempner W. K., Warnock W. W., Clark T. A., Hutton L. K., Morandino G. E., Rönnang B. O., Rydbeck O. E. M., Niel A. E.— Astrophys. J., 1974, 193, № 2, part I, p. 293.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

APPARATURE COMPLEX OF SMALL-BASE INTERFEROMETER OF CENTIMETER WAVE LENGTH WITH CABLE LINKS OF CONNECTION FOR ASTROPHYSICAL AIM

V. A. Alekseev, A. E. Kryukov, B. N. Lipatov, A. S. Sizov

The apparatus complex centimeter wave length radiointerferometer for astrophysics investigation with cable links connection between antennas is described. The radiointerferometer measures the modulus of the radio source visibility function. The rate fringe control is performed by retuning of the second local oscillators signal frequency in each reception point. At the moment of the radio source observation the Fourier analysis is made of rate fringe in the real time scale with the spectral resolution of 0,01 Hz in the standart case which corresponds coherent integration time 100 s. The interference may be performed in the frequency band of 50 MHz and 500 kHz. Some results of experimental check are given. Possibilities are discussed for the operation of the complex in the case interferences on input of antennas.