

Система декаметровых радиointерферометров УРАН (ч. II)*. Аппаратура и методика наблюдений

А. В. Мень, С. Л. Рашковский, В. А. Шепелев,
А. С. Белов, В. В. Шевченко

*Радиоастрономический институт НАН Украины
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

Статья поступила в редакцию 14 января 1999 г.

Статья является продолжением цикла работ, посвященного описанию радиоастрономической системы декаметровых интерферометров УРАН, расположенных на территории Украины. В ней рассматриваются особенности построения РСДБ этого диапазона, приводится описание аппаратного комплекса и методики проведения наблюдений и калибровок.

Стаття є продовженням циклу робіт, присвяченого опису радіоастрономічної системи декаметрових інтерферометрів УРАН, розташованої на території України. В ній розглянуто особливості побудови РНДБ цього діапазону, наводиться опис апаратного комплексу та методики проведення спостережень і калібрування.

В предыдущей работе данного цикла [1] были описаны принципы построения антенных систем и общая структура системы интерферометров декаметрового диапазона УРАН. Ниже мы подробнее рассмотрим построение аппаратного комплекса этой системы и методы проведения экспериментов.

1. Особенности декаметровой РСДБ

До создания системы УРАН исследователи, за редкими исключениями, избегали работ по интерферометрии космических объектов в декаметровом диапазоне радиоволн. Кроме перечисленных в первой статье настоящего цикла соображений, связанных с проблемами создания пригодных для работы в этом диапазоне антенн, причинами этого явились такие особенности декаметрового диапазона, как высокий уровень естественных и искусственных (от вещательных станций) помех, сильные искажения сигналов, вызываемые действием ионосферы, а также очень высокий уровень галактического фона.

Однако в результате уже первых проведенных на интерферометре УРАН-1 исследований оказалось, что при работе в ночное время с относительно узкими полосами принимаемых сигналов (~20 кГц) стационарные помехи слабо влияют на работу системы. Воздействие же ионосферы сказывается на результатах и методике измерений гораздо сильнее. Хотя поглощение декаметровых волн в ионосфере невелико, но модуляция амплитуды и фазы при-

маемого сигнала, связанная с искажениями волнового фронта из-за неоднородностей ионосферы, весьма значительна даже при наблюдениях на отдельном радиотелескопе. Как следствие, происходит расширение спектра полезного сигнала, препятствующее длительному его накоплению. В результате, даже в наилучших условиях, максимальное время интегрирования не превышает десятков секунд.

Кроме того, этот же эффект (наряду с отсутствием в декаметровом диапазоне достаточного количества мощных точечных объектов и относительно небольшим потенциалом системы) пока не позволил разработать адекватную методику фазовых измерений, делающую возможным апертурный синтез.

Другим источником проблем для декаметровой интерферометрии является поворот ионосферой плоскости поляризации сигнала. Так как антенна УТР-2 принимает сигнал только одной линейной поляризации, а на разных приемных пунктах за счет спорадических неоднородностей в ионосфере длина фазового пути не только не одинакова, но еще и меняется во времени, то коррелированная с ней компонента на другом телескопе имеет иную, переменную во времени, ориентацию, что приводит к сильным вариациям уровня выходного сигнала. Для борьбы с этим эффектом все антенны УРАН принимают две ортогональные поляризации сигнала (именуемые ниже А и В), а приемная аппаратура пунктов УРАН и последующая корреляционная обработка строится по

* Эта статья — вторая из цикла, посвященного описанию системы декаметровых интерферометров УРАН.

двухканальной схеме. В каждом из каналов выполняются одинаковые действия, а истинный сигнал восстанавливается лишь на конечном этапе обработки.

Все эти факторы существенно влияют как на методики проведения экспериментов и обработки результатов, так и на построение аппаратного комплекса.

2. Аппаратура

Общим пунктом для всей системы интерферометров является УТР-2, использующий для приема антенну “Север-Юг” этого телескопа. Структура его аппаратного комплекса показана на рис. 1.

Сигналы суммарного выхода антенны поступают на входы радиоприемных устройств

Р-155 с двойным преобразованием частоты. Таких приемников два — по количеству одновременно принимаемых частот. Гетеродины приемников выполнены в виде синтезаторов частоты, допускающих синхронизацию от внешнего опорного генератора. В качестве такого генератора использован рубидиевый стандарт частоты, что обеспечивает стабильность местных гетеродинов, необходимую для проведения интерферометрических наблюдений. Принятые сигналы преобразуются ко второй промежуточной частоте (ПЧ) приемников, равной 128 кГц. Ширина принимаемой полосы сигналов определяется требованиями помехоустойчивости и скоррелированности сигналов в полосе и выбрана равной 20 кГц.

Принятые приемниками сигналы поступают на блок третьего преобразования частоты (БПЧ), назначение которого:

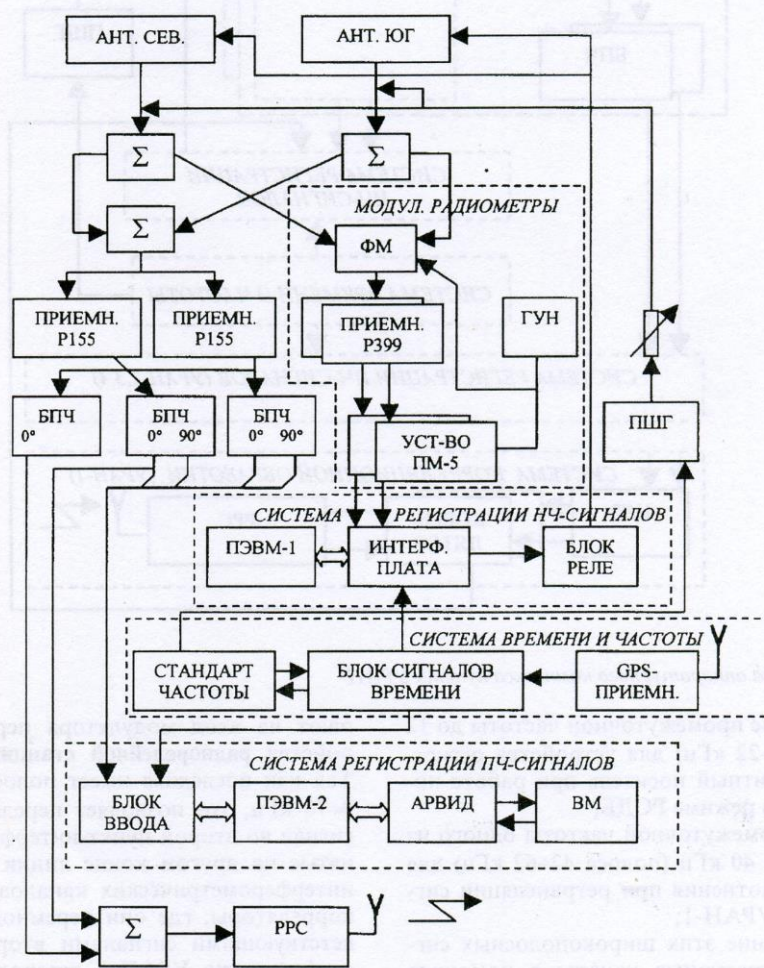


Рис. 1. Блок-схема аппаратного комплекса пункта УТР

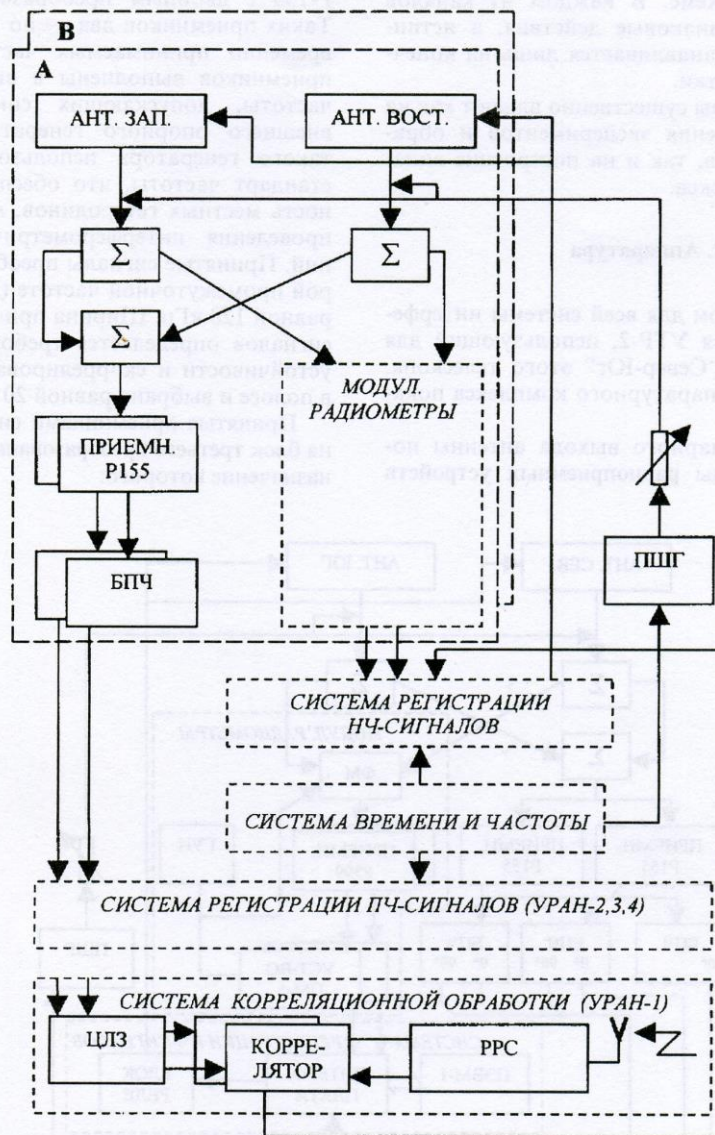


Рис. 2. Блок-схема аппаратного комплекса пункта УРАН

а) понижение промежуточной частоты до 12 кГц (полоса $2 \div 22$ кГц) для устройства регистрации на магнитный носитель при работе интерферометра в режиме РСДБ;

б) сдвиг промежуточной частоты одного из приемников на 40 кГц (полоса $42 \div 62$ кГц) для частотного уплотнения при ретрансляции сигналов в пункт УРАН-1;

в) расщепление этих широкополосных сигналов на квадратурные каналы с помощью сдвинутых на 90° гетеродинных сигналов.

Сигналы в полосах частот $2 \div 22$ кГц и $42 \div 62$ кГц суммируются между собой и посту-

пают на вход модулятора передающего устройства радиорелейной станции (РРС) Р-405. Так как последняя имеет полосу пропускания $0 \div 70$ кГц, это позволяет передать суммарный сигнал во второй пункт интерферометра. Принятые на другом конце линии связи сигналы интерферометрических каналов поступают на корреляторы, где они перемножаются с соответствующими сигналами второго плеча интерферометра УРАН-1, гетеродинированными к тем же промежуточным частотам.

Аппаратурный комплекс всех остальных пунктов УРАН (рис. 2) отличается от комплек-

са, установленного на УТР-2, наличием дополнительного комплекта двух таких же радиоприемных устройств Р-155, предназначенных для приема сигналов второй поляризации. Блок третьего преобразования частоты для длинноволновых интерферометров УРАН-2, УРАН-3 и УРАН-4 имеет промежуточную частоту 12 кГц для обоих частотных каналов, а для УРАН-1 – 12 кГц для одной частоты и 52 кГц для другой (как и соответствующие сигналы, ретранслированные из пункта УТР-2).

Для измерения мощности сигналов, принимаемых антеннами от исследуемых радиоисточников, каждый из пунктов интерферометра оснащен **радиометрами** модуляционного типа. В их состав входят генератор управляющих напряжений (ГУН), дискретные фазовые модуляторы (ФМ), коротковолновые радиоприемники Р-399 и модуляционные выходные устройства (ПМ-5). Последние включают квадратор и синхронный интегратор с постоянной времени, устанавливаемой в пределах 4÷60 с. ГУН осуществляет синхронное управление модулятором и интегратором радиометра. В пунктах УРАН таких радиометров четыре – по числу одновременно принимаемых частотных и поляризационных каналов.

В пункте УТР-2 одновременно на двух рабочих частотах регистрируются сигналы на выходах трех лучей антенны “Север-Юг”, разнесенных на 0.5° , что необходимо для учета изменения видимых координат источника из-за рефракции (альтернативный способ учета рефракции описан ниже). Параллельно с интерферометрическими измерениями определяются плотности потоков исследуемых объектов. Для уменьшения эффекта спутывания одновременно используется антенна полного телескопа УТР-2 и на тех же частотах проводится регистрация сигналов трех его лучей. То есть в пункте УТР-2 при интерферометрических исследованиях используются 12 радиометров. (Для упрощения на рис. 1 показаны только радиометры, работающие с тем лучом антенны “Север-Юг”, сигнал которого ретранслируется на пункт УРАН-1.)

Выходные сигналы радиометров всех пунктов представляют собой низкочастотные сигналы с полосой до 1 Гц. Для их записи на магнитный носитель используется **система регистрации низкочастотных сигналов**, построенная на IBM-совместимом компьютере (ПЭВМ-1). Для этого на интерфейсной плате компьютера расположены восьмиразрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и аналоговый шестнадцативходовый коммутатор, позволяющий поочередно подключать выходы радиометров к входу АЦП. Преобразованные в цифровую форму сигналы затем вводятся в компьютер для регистрации и отображения.

Как отмечалось в [1], управление лучами телескопов дискретное и возможно в двух режимах – ручном и автоматическом. В первом из них наблюдатель сам включает рассчитанные заранее коды положения луча, ориентируя его на источник космического излучения. В автоматическом режиме тот же компьютер ПЭВМ-1 по заданным координатам источника рассчитывает положение луча и записывает соответствующие коды в регистр, расположенный на интерфейсной плате. Далее через блок реле производится управление телескопом.

Одной из важнейших систем интерферометров с независимой регистрацией является **система времени и частоты**, без которой невозможно последующее совмещение и корреляционная обработка записей. Необходимая стабильность местных гетеродинов и шкал времени обеспечивается использованием рубидиевых стандартов частоты и времени Ч1-74 со стабильностью не хуже 10^{-11} . Для взаимной синхронизации шкал точного времени элементов системы УРАН используется привязка по сигналам спутников координатно-временной сети GPS (Global Position System). Система синхронизации использует специальные 6-канальные GPS приемники SVeeSix-СМ3 фирмы Trimble и позволяет синхронизовать местные шкалы с точностью не хуже 1 мкс, что вполне достаточно для системы УРАН. Для синхронизации таких процессов, как сбор и регистрация радиометрической информации, регистрация широкополосных сигналов промежуточной частоты, и синхронизации псевдощумовых калибровочных генераторов (ПШГ) специальный блок сигналов времени вырабатывает параллельный двоичный код времени, а также тактовый сигнал 1 Гц шкалы времени. Системой синхронизации местной шкалы оборудован также и интерферометр УРАН-1, где она необходима для синхронизации калибровочных генераторов.

Обязательной частью РСДБ систем с независимой регистрацией является **система регистрации широкополосных сигналов ПЧ** и сопряженная с ней система их кросс-корреляционной обработки. На высоких частотах, где потоки информации составляют единицы и десятки мегабит в секунду, применяют, как правило, однобитное (знаковое) преобразование аналоговых сигналов в цифровые. Эти сигналы, с добавленными в них метками времени, записываются на широкополосные магнитофоны, например, видеоманитофоны в системе регистрации Mark II [2]. При воспроизведении и кросс-корреляционной обработке применяют достаточно сложные системы синхронизации воспроизведения магнитных записей, буферизирования цифровых потоков и специализированные кросс-корреляционные процессоры.

На дециметровых волнах из-за узких полос принимаемых сигналов поток информации существенно ниже, и соответствующие системы построены иначе. Вместо обычно применяемых знаковых корреляторов и соответствующих одноразрядных АЦП в интерферометрах УРАН используется двухразрядное (4-уровневое) квантование, несколько повышающее соотношение сигнал/шум при незначительном усложнении тракта записи. Преобразованные сигналы поступают в универсальную ПЭВМ (ПЭВМ-2), осуществляющую буферизацию данных, привязку их к местной шкале времени, а также управление всеми процессами регистрации. Файл с накопленными в компьютере данными переписывается на ленточный накопитель – стриммер. Последующая кросс-корреляционная обработка также осуществляется при помощи универсальной ПЭВМ, что позволяет отказаться от сложных систем синхронизации воспроизведения и корреляционных процессоров.

Блок ввода в системе регистрации ПЧ сигналов выполнен в стандарте КАМАК. В нем сигналы с четырех выходов блока третьего преобразования частоты поступают на параллельные АЦП (выполненные на быстродействующих компараторах) с частотой выборки 50 кГц. Преобразованные в двоичную форму сигналы накапливаются в одном из двух буферных ОЗУ емкостью 2К 16-разрядных слов каждое. После заполнения одного из буферных ОЗУ данные из него посредством контроллера IBM-КАМАК переносятся в ОЗУ компьютера. Параллельно в это же время идет заполнение второго буферного ОЗУ. Таким образом исключаются потери сигналов, т. к. процессы записи и считывания, выполняемые в одном ОЗУ, могли бы мешать друг другу. Данные, накопленные в ОЗУ компьютера, периодически (1 раз в 100 мс) переписываются на жесткий диск ПЭВМ.

Через тот же блок ввода производится синхронизация работы системы по сигналам блока времени. Для этого на него поступает 20-разрядный код времени, синхронизованный с тактовым сигналом 1 Гц местной шкалы времени, и опорный сигнал 1 МГц. Они используются для формирования 25-разрядного кода времени, регистрируемого на ленте, и сигналов, управляющих работой АЦП и буферных ОЗУ.

Накопленная на жестком диске информация под управлением ПЭВМ переписывается на магнитную ленту. В качестве устройства записи используется плата сопряжения АРВИД-1020 с видеоманитофоном. Эта плата, установленная в компьютере, позволяет построить на базе бытовых видеоманитонов (ВМ) стандарта VHS ленточный накопитель – стриммер – емкостью 2 Гб на стандартной 3-

часовой видеокассете при скорости передачи информации в режиме записи и чтения 200 кб/с.

В качестве управляющего компьютера ПЭВМ-2 использована IBM-совместимая машина с процессором Intel80386DX40, ОЗУ 2Мб, жестким диском 80 Мб.

При кросс-корреляционной обработке файлы, содержащие записи сигналов, с помощью аналогичных стриммеров АРВИД переносятся на жесткий диск обрабатывающего компьютера. Вся последующая корреляционная обработка осуществляется на программном уровне. При использовании ПЭВМ уровня Pentium 200 с жестким диском большой емкости получение корреляционного продукта для одной пары интерферометров занимает примерно то же время, что и запись исходных сигналов.

Интерферометр УРАН-1 работает в режиме реального времени, и в нем не используется регистрация сигналов ПЧ, а, как указывалось выше, применяется ретрансляция и непосредственное перемножение аналоговых широкополосных сигналов в **системе корреляционной обработки** (см. рис. 2).

Как известно, полезные сигналы, принятые от наблюдаемого источника приемниками в двух пунктах, сдвинуты на частоту доплеровского сдвига, лежащую для интерферометра УРАН-1 в диапазоне $f_u = 0.1 \div 0.3$ Гц, в результате чего полезный сигнал на выходе коррелятора интерферометра находится в этой же полосе. Он формируется как когерентная сумма составляющих, образующихся при перемножении скоррелированных спектральных компонент f_i широкополосных входных сигналов, сдвинутых на частоту $f_u = f_{2i} - f_{1i}$ (индексы 1 и 2 относятся к первому и второму телескопу интерферометра соответственно). Шумовой сигнал на выходе перемножителя образуется как некогерентная сумма элементарных биений всех возможных пар спектральных составляющих входных сигналов, формируя треугольный спектр шириной $2F_{ПЧ} \approx 40$ кГц ($F_{ПЧ}$ – полоса принимаемого сигнала). Интерференционные колебания разностной частоты f_u в полосе $0.1 \div 0.3$ Гц выделяются фильтром на выходе перемножителя. Поскольку спектры входных сигналов перемножителя перекрываются, в полосу выходного фильтра попадают и колебания вида $f_u = f_{1i} - f_{2i}$, которые, являясь некогерентными, уменьшают соотношение сигнал/шум на выходе коррелятора. Применяемый на УРАН-1 коррелятор [3] отличается повышенным в два раза по сравнению с классической схемой радиометрическим выигрышем, что достигается с помощью фазовой компенсации разностных колебаний второго вида. Для этого в схему коррелятора добавлен второй канал перемножения широкополосных сигналов ПЧ, имеющий в своем составе два 90-

градусных фазовращателя. Разностные колебания вида $f_{1i} - f_{2i} = f_u$, которые лишь увеличивают шум в выходном сигнале, на выходе дополнительного канала сдвинуты на 180° по отношению к аналогичному сигналу основного канала, тогда как полезные колебания в обоих каналах синфазны. Подав выходные сигналы обоих каналов на суммирующее устройство, удастся подавить шумовые колебания и увеличить соотношение сигнал/шум на выходе коррелятора.

После фильтрации узкополосным гираторным фильтром интерференционные колебания поступают на два смесителя, предназначенные для расщепления этих сигналов на две квадратурные (со сдвигом фаз 90°) компоненты, что дает возможность рассматривать выходной сигнал как комплексный. Полученные колебания подаются на описанную выше систему регистрации НЧ сигналов.

На один из входов корреляторов сигналы промежуточной частоты поступают из пункта УТР-2 через радиорелейную линию, а на второй вход – с выходов приемников пункта УРАН-1. При этом они проходят через цифровую линию регулируемой задержки (ЦЛЗ), имеющую четыре канала (по количеству рабочих частот и поляризации). Эта линия компенсирует разницу времени распространения сигналов от источника до антенн интерферометра и задержку в ретрансляционной линии, обеспечивая точное совмещение по времени перемножаемых колебаний. Поскольку задержка зависит от меняющегося во времени направления на источник радиоизлучения, она периодически вычисляется компьютером ПЭВМ-1 и автоматически подается на управление ЦЛЗ.

На входе ЦЛЗ установлен АЦП, с выхода которого дискретизованный двоичный сигнал поступает в ОЗУ. Считанные из ОЗУ с расчетной задержкой сигналы преобразуются снова в аналоговую форму в цифроаналоговом преобразователе. Особенностью ЦЛЗ является применение малоразрядного АЦП (4 разряда) с повышенной по сравнению с котельниковской частотой преобразования (1 МГц). Эта частота определяется минимальным дискретом задержки сигналов, принятым равным 1 мкс. В то же время такая повышенная частота квантования позволяет даже при малоразрядном АЦП [4] получить малые (не более 1%) по сравнению с полностью аналоговой схемой потери отношения сигнал/шум в корреляционном приемнике. Уменьшение же количества разрядов значительно упростило АЦП и уменьшило объем запоминающего устройства. Хотя малоразрядность АЦП приводит к ограничению динамического диапазона линии задержки, но условия работы интерферометра УРАН-1 таковы, что интенсивность практически всех исследуемых

радиоисточников меньше уровня распределенного космического радифона и динамический диапазон входных сигналов интерферометрических приемников невелик. Преимуществом цифровой линии задержки по сравнению с аналоговой является также точность, стабильность и независимость коэффициента передачи от величины установленной задержки.

3. Методика измерений

Как известно, используемая на высоких частотах методика определения функции видности (ФВ) заключается в сравнении измеренных с помощью данного интерферометра коррелированных откликов от исследуемого и калибровочного (с известной на данной частоте структурой) источников. Функция видности исследуемого источника $\gamma(t)$ при этом определяется как

$$\gamma(t) = \gamma^k \frac{P_{\text{корр}}^i}{P_{\text{корр}}^k}, \quad (1)$$

где $P_{\text{корр}}^i$ и $P_{\text{корр}}^k$ – коррелированная на данной базе часть подного потока излучения, принятого интерферометром от исследуемого (индекс i) и калибровочного (k) источников, γ^k – ФВ калибровочного источника.

Отметим, что для интерферометров с переменной длиной базы калибровочным может служить и исследуемый радиоисточник, наблюдаемый данным интерферометром на меньшей базе, где его можно считать точечным ($\gamma^k = 1$).

В декаметровом диапазоне радиоволн воспользоваться такой методикой затруднительно, так как параметры применяемых для наблюдений антенн-решеток существенно зависят от ориентации луча и, кроме того, отсутствует априорная информация о структуре источников. Использование же для калибровки самого исследуемого объекта (путем изменения базы) невозможно ввиду больших габаритов применяемых антенн-решеток. Эти причины привели к разработке методики определения ФВ [5], основанной на одновременном измерении текущих значений коррелированной мощности на выходе интерферометра P_u и полных мощностей P_p^1 , P_p^2 сигналов, принятых от исследуемого источника каждой из антенн интерферометра и измеренных радиометрами. Функция видности при этом определяется как

$$\gamma(t) = \frac{P_u(t)}{\sqrt{P_p^1(t)P_p^2(t)}}. \quad (2)$$

Величины P_p^1 , P_p^2 и P_u в (2) должны быть выражены в одинаковых единицах, поэтому интерферометрический приемник и радиометры должны быть прокалиброваны с помощью общего шумового генератора. Обозначив мощность, принимаемую от калибровочного генератора на выходе интерферометра, через H_u , а мощности на выходах радиометров – H_1 и H_2 , запишем это выражение как

$$\gamma(t) = \frac{\frac{P_u(t)}{H_u}}{\sqrt{\frac{P_p^1(t)P_p^2(t)}{H_1H_2}}} \quad (3)$$

Сигналы калибровочного генератора можно интерпретировать как принятые от калибровочного источника. При равенстве мощностей калибровочных генераторов H_1 , H_2 мощностям P_p^1 , P_p^2 , принятым от исследуемого источника, выражение (3) сводится к (1) при $\gamma^k = 1$, то есть такой метод является методом калибровки с помощью искусственного точечного источника. Из-за значительной удаленности пунктов интерферометра воспользоваться единым шумовым генератором невозможно. Однако наличие в каждом пункте синхронизованных с высокой точностью шкал времени позволяет использовать независимые цифровые генераторы псевдошумового сигнала (ППШГ на рис. 1 и 2), работающие синхронно и дающие отклик на выходе интерферометра. В них для создания калибровочного сигнала используются генераторы квазислучайных двоичных последовательностей. Тактовая частота ППШГ выбрана равной 125 кГц, а период сформированных последовательностей – одной секунде. Эта тактовая частота синхронизируется рубидиевым стандартом частоты, а начало формирования двоичной последовательности привязывается к секундным меткам местной шкалы времени на каждом пункте.

Выходной сигнал такого цифрового генератора представляет собой набор отстоящих друг от друга на 1 Гц спектральных составляющих с амплитудой, распределенной по закону $\sin x/x$, первый ноль которых совпадает с тактовой частотой. Это позволяет получить псевдошумовой сигнал с малой неравномерностью спектра в рабочей полосе частот. На рабочую частоту калибровочные сигналы переносятся с помощью балансного модулятора и дополнительного гетеродина, также синхронизованного от стандарта частоты. Таким образом, сформированные генераторами псевдошумовые сигналы оказываются скоррелированными

в разных пунктах УРАН и могут быть использованы для калибровки интерферометра.

Калибровка производится перед началом записи: выход антенны отключается, в течение ~3 мин регистрируется ноль аппаратуры, а затем на вход приемной системы подается сигнал от ППШГ и также регистрируется в течение 3 мин.

Как указывалось в [1], антенные системы интерферометров УРАН состоят из двух одинаковых половин. Сигналы на входы интерференционного приемника поступают от суммарного выхода антенн. Мощность сигнала $P_a(t)$ на этом выходе антенны описывается выражением

$$P_a(t) \sim E^2 f^2(t) \cos^2\left(\frac{\varphi(t)}{2}\right), \quad (4)$$

где E – напряженность поля; f – нормированная диаграмма направленности половины антенны (по полю); φ – разность фаз сигналов, принятых половинами антенны.

Модуляционные же радиометры осуществляют *перемножение* полезных сигналов от двух половин каждой антенны-решетки, следовательно, мощность сигнала на радиометрическом выходе

$$P_p \sim E^2 f^2(t) \cos \varphi(t), \quad (5)$$

т. е. оценки мощности в (4) и (5) при $\varphi \neq 0$ отличаются.

При определении текущего значения модуля ФВ это различие сигналов на выходах антенн интерферометра учитывается поправками K_1 и K_2 , отражающими отличие диаграмм направленности на “суммарном” и “радиометрическом” выходах антенн. Тогда выражение (3) приобретает вид:

$$\gamma(t) = \frac{P_u(t) \sqrt{H_1 H_2}}{H_u \sqrt{P_p^1(t) P_p^2(t)}} K_1 K_2. \quad (6)$$

В отсутствие искажений волнового фронта, когда положение радиоисточника соответствует расчетному, для каждого пункта интерферометра можно вычислить текущую величину

$$\varphi(t) = \frac{2\pi d}{\lambda} (l(t) - l_0) \quad (\text{где } d - \text{разнос половин антенны, } \lambda - \text{длина волны, } l - \text{направляющий косинус прихода волны, } l_0 - \text{направляющий косинус ориентации антенны) и соответствующую поправку } K(t) = 1 - \text{tg}^2(\varphi(t)/2).$$

Однако в реальных условиях дециметрового диапазона присутствие ионосферных неоднородностей

родностей искажает расчетную зависимость $\varphi(t)$, что приводит к изменениям видимого положения источника и искажениям ДН радиотелескопа, т. е. при использовании расчетных поправок ведет к большим ошибкам в определении модуля функции видности. Возможно несколько уровней компенсации таких воздействий ионосферы.

В простейшем случае можно учитывать только медленные крупномасштабные ионосферные флуктуации. Тогда направление прихода сигнала мало меняется за время прохождения источника через ДН, и его отличие от расчетного может быть интерпретировано как небольшое изменение координат источника. Благодаря тому, что применяемые антенны имеют ДН ножевого типа, источник рано или поздно пересечет ее, и рефракция вызовет лишь смещение по времени записи прохождения источника через ДН. Так, на рис. 3 изображено сечение ДН антенны (по уровню 50 % мощности) — эллипс 1, и расчетная траектория источника — 2. Внизу показана запись прохождения источника через ДН (кривая 3), т. е. выходной сигнал радиометра в зависимости от времени. В результате влияния ионосферы видимое положение источника может измениться и его траектория (пунктир 4) пересечет ДН в другом месте. Это приведет к перемещению во времени результирующей записи радиометра (пунктир 5). Такое смещение может быть измерено и учтено при расчете поправок, т. к. “суммарная” и “радиометрическая” ДН сдвигаются одинаково. Хотя новое сечение диаграммы не полностью идентично расчетному, реально ошибки в определении модуля ФВ при этом обычно не превышают 1 %.

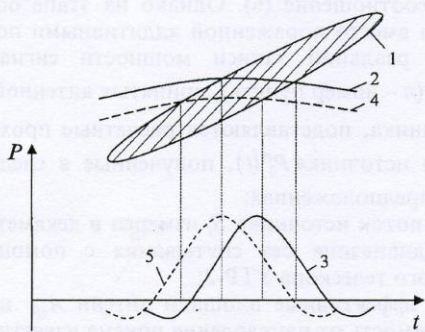


Рис. 3. Влияние рефракции на радиометрические записи

Более сложный вариант обработки, применяемый сейчас на практике, учитывает, что во многих случаях угол прихода радиоволн не

остается постоянным за время прохождения источника через ДН. При таких флуктуациях искажается форма ДН, приводя к большим ошибкам в определении ФВ. В этом варианте учет рефракционных ошибок заключается в использовании в измерительном комплексе каждого пункта дополнительного модуляционного радиометра с фазовым сдвигом сигналов между половинами антенны, равным на рабочей частоте $\pi/2$. Сигнал на выходе такого радиометра в отличие от (5) имеет вид:

$$P'_p \sim E^2 f^2(t) \sin \varphi(t). \quad (7)$$

Из отношения записей мощности, принимаемой от источника обоими радиометрами, определяется текущая величина

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \frac{P'_p(t)}{P_p(t)} \quad (8)$$

и вычисляется истинная поправка $K(t)$ для каждого момента времени.

На рис. 4, а приведены экспериментальные записи “косинусной” — кривая 1, и “синусной” — 2, диаграммы направленности, полученные при наблюдении источника ЗС461 на антенне “Север-Юг” УТР-2 18.08.89 г. на частоте 20 МГц. Текущая зависимость $\varphi(t)$ показана на рис. 4, б сплошной линией, расчетная зависимость — штриховой. Видны “быстрые” флуктуации фазы, соответствующие изменению углов прихода радиоволн.

Использование такого способа учета рефракционных ошибок на интерферометре УРАН-1 показало, что разброс текущих значений модуля функции видности радиостанции существенно меньше, чем при обычной обработке. Для примера на рис. 5 приведены результаты эксперимента 16.08.89 г. по наблюдению источника ЗС461 на интерферометре УРАН-1 на частоте 20 МГц. Сплошной линией показаны текущие значения модуля функции видности при обычной обработке, а штриховой — при использовании для определения поправок информации об угле прихода радиоволн. Средние значения модуля ФВ, соответствующие этим двум вариантам обработки, показаны точечными линиями 1 и 2 соответственно. Как следует из рис. 5, использование этого метода снижает разброс данных и позволяет точнее оценить среднее значение функции видности. Эффективность предложенного метода особенно высока в низкочастотной области рабочего диапазона, где рефракция радиоволн более существенна.

В условиях еще больших возмущений волнового фронта ДН искажена столь сильно, что предлагаемый способ перестает быть

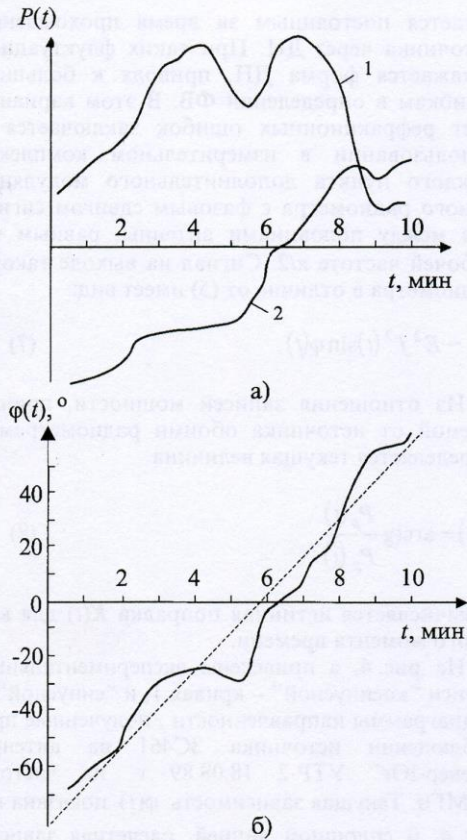


Рис. 4. Определение истинной разности фаз сигналов, принятых половинами антенн, по записям синусной (1) и косинусной (2) диаграмм направленности

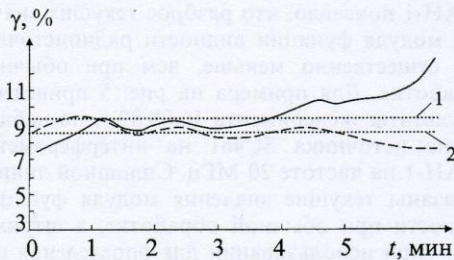


Рис. 5. Учет влияния быстрых ионосферных флуктуаций на определение функции видности

эффективным. В зависимости $\varphi(t)$ наблюдаются даже разрывы, что, возможно, связано с многолучевостью распространения радиоволн. Но в такой ситуации обычно также искажена интерференционная картина и существенно влияние станционных помех. Так как корректный учет результатов подобных наблюдений

вообще невозможен, то эти записи исключаются из дальнейшей обработки.

Методику определения ФВ исследуемого радиоисточника, основанную на измерении отношения коррелированного отклика интерферометрического приемника к полной мощности сигналов, принятых от источника каждой из антенн (см. соотношение (6)), мы ниже называем “абсолютной” методикой в противовес “относительной” методике, применяемой на высоких частотах, где ФВ определяется по отношению к калибровочному источнику (1).

“Абсолютная” методика не чувствительна к модуляции сигнала (мультипликативным помехам) из-за изменения затухания в ионосфере и искажений волнового фронта, типичных для декаметрового диапазона. Однако относительно слабые аддитивные помехи, изменяющие величину отклика радиометра в одном из пунктов интерферометра, искажают значения ФВ, поскольку интерференционный приемник к ним не чувствителен. К наиболее опасным помехам такого рода относится спутывание сигналов от близко расположенных источников. Эффект спутывания ограничивает чувствительность всей системы интерферометров и особенно заметно проявляется в антеннах УРАН, имеющих существенно меньшие размеры, чем центральный инструмент системы — антенна “Север-Юг” радиотелескопа УТР-2. Так, например, если чувствительность УТР-2 ограничена спутыванием на уровне $15 \div 20$ Ян, то для антенн УРАН спутывание может проявляться уже при наблюдениях источников с потоком $200 \div 300$ Ян.

Для увеличения чувствительности методика наблюдений была модифицирована (“модифицированная абсолютная” методика). В ней для вычисления функции видности также используется соотношение (6). Однако на этапе обработки вместо пораженной аддитивными помехами реальной записи мощности сигналов $P_p^n(t)$ (n — номер пункта), принятых антенной от источника, подставляются расчетные прохождения источника $P_0^n(t)$, полученные в следующих предположениях:

1. поток источника S_i измерен в декаметровом диапазоне без спутывания с помощью полного телескопа УТР-2;
2. эффективные площади антенн A_{eff} и их зависимость от направления приема известны;
3. мультипликативные помехи невелики.

Тогда в (6) $P_p^n(t)$ заменяется на $P_0^n(t) = S_i A_{eff} F_n(l, m)$, где $F_n(l, m)$ — расчетная ДН соответствующей антенны интерферометра (l и m — направляющие косинусы прихода сигнала). Такая модификация позволяет про-

дить наблюдения источников вплоть до потоков, ограниченных чувствительностью УТР-2 или соответствующего интерферометра.

При наблюдениях на интерферометрах системы УРАН вместо непрерывного слежения диаграммой антенны за источником, запись ведется отдельными сканами – антенна (и ЦЛЗ на УРАН-1) устанавливается с упреждением на половину длины скана. За счет вращения Земли источник перемещается через ДН телескопа, и после окончания записи скана антенна переключается в следующее положение. Длина скана выбрана равной 20 мин. При этом проводится запись, повторяющая формой ДН телескопа и включающая первый боковой лепесток. Тогда при обработке удастся оптимально вписать в радиометрическую запись расчетную ДН телескопа, определить смещение источника, вызванное рефракцией, и используемые для корректного расчета поправки K_1 и K_2 в (6), а также истинный ноль записи, смещенный из-за влияния аддитивных помех. Чтобы проследить изменения функции видности от часового угла (именно эти изменения несут в себе информацию о структуре источника), запись одного источника продолжается до 6 часов (± 3 часа от кульминации), т. е. включает до 18 сканов.

Описанная выше аппаратура в сочетании с применением изложенной методики измерений дает возможность проводить регулярные измерения в этом сложном для астрономических наблюдений диапазоне.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность академику НАН Украины С. Я. Брауде за неоценимую научную и организационную помощь и

сотрудникам РИ НАН Украины А. Д. Христенко и Г. С. Подгорному за их участие в изготовлении и эксплуатации аппаратуры.

Литература

1. А. В. Мень, С. Я. Брауде, С. Л. Рашковский и др. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №4, с. 385-401.
2. В. G. Clark. Proc. IEEE. 1973, 62, No. 9, pp. 1242-1248.
3. А. В. Мень. Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1983, 26, №7, с. 775-785.
4. F. K. Bowers, D. A. White, T. J. Landecker, R. J. Klinger. Proc. IEEE. 1973, 62, No. 9, pp. 1339-1343.
5. В. П. Бовкун, А. В. Мень. Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1983, 26, №11, с. 1357-1370.

URAN System of Decametric Interferometers (II). Equipment and Observation Methods

A. V. Megn, S. L. Rashkovskiy, V. A. Shepelev,
A. S. Belov, V. V. Shevchenko

The paper continues the cycle of articles related to description of the URAN decameter wavelength interferometer network for radio astronomy located in Ukraine. Peculiarities of constructing VLBI for this frequency range are discussed, the URAN network equipment system, as well as methods of observation and calibration are described.