

УДК 520.274

С. Л. РАШКОВСКИЙ<sup>1</sup>, А. С. БЕЛОВ<sup>1</sup>, А. С. ИВАНОВ<sup>1</sup>,  
А. Б. ЛОЗИНСКИЙ<sup>2</sup>, В. А. ШЕПЕЛЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: shep@ri.kharkov.u

<sup>2</sup>Физико-механический институт имени Г. В. Карпенко НАН Украины,  
ул. Научная, 5, г. Львов, 79601, Украина

## НОВЫЙ АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УРАН

*Применявшиеся ранее радиоприемные устройства интерферометров УРАН с полосой пропускания 20 кГц позволяли проводить наблюдения в условиях высокого уровня помех в декаметровом диапазоне, однако существенно ограничивали количество наблюдаемых радиоисточников. В настоящей работе обоснована необходимость расширения полосы приема для повышения чувствительности сети УРАН. Рассмотрены физические и технические ограничения на ширину полосы, определены требования к новой приемной и регистрирующей аппаратуре интерферометров. Описан новый аппаратурный комплекс с расширенной до 250 кГц полосой регистрации сигналов и программной фильтрацией помех. Приведена разработанная методика наблюдений, позволившая повысить точность и производительность интерферометрических измерений.*

*Ключевые слова:* интерферометр, декаметровый диапазон, полоса пропускания

### 1. Введение

Сеть интерферометров декаметрового диапазона УРАН [1] успешно использовалась для исследования структуры радиоисточников космического излучения более 20 лет. К 2000 г. были проведены наблюдения около 30 наиболее мощных (с плотностью потока более 100 Ян) радиоисточников каталога 3С. За прошедшее время как аппаратурно-программный комплекс, так и используемые методики подвергались неоднократным усовершенствованиям. Так, средства регистрации широкополосных сигналов, следуя мировым тенденциям и развитию компьютерной техники, прошли путь от аналоговых многоканальных магнитофонов до цифровых накопителей на жестких магнитных дисках компьютера, а приемная и регистрирующая аппаратура была дополнена для проведения одновременных наблюдений на двух рабочих частотах диапазона. Методика определения функций видности (ФВ) [2] была усовершенствована с целью увеличения чувствительности по спутыванию [3, 4], а также был разработан метод восстановления распределения радиояркости в отсутствие информации о фазе ФВ [5]. Эти разработки успешно использованы для определения угловой структуры радиоисточников, наблюдавшихся с помощью сети УРАН, с рекордным для данного частотного диапазона угловым разрешением 1". В то же время для обеспечения защиты от помех полоса приемников оставалась достаточно узкой, что

ограничивало флуктуационную чувствительность на уровне  $15 \div 20$  Ян и уменьшало число объектов, доступных для исследования.

Отметим также, что интерферометры УРАН-3 и УРАН-4 с длиной базы 946 и 613 км соответственно чувствительны только к компактным деталям источников с размерами порядка угловой секунды. Рассеивание радиоизлучения на неоднородностях межзвездной среды увеличивает наблюдаемый размер таких деталей, уменьшая их интерферометрический отклик. Для внегалактических радиоисточников угол рассеивания можно определить с помощью соотношения [6]

$$\theta_s \cong 20(\lambda/0.1)^{2.2} (\sin b)^{-0.6}, \quad (1)$$

где  $b$  – галактическая широта;  $\lambda$  – длина волны, м;  $\theta_s$  – угол рассеивания, угл. мкс.

К тому же в компактных компонентах может наблюдаться синхротронное самопоглощение излучения и их поток уменьшится с понижением частоты в соответствии с выражением

$$S = \frac{1.82\theta^2 v^{5/2}}{\gamma^{1.32} B^{1/2} (1+z)^{1/2}} \times \left[ 1 - \exp \left( -0.55 \gamma^{1.32} \theta^{-2} B^{1/2} (1+z)^{1/2} S_1 v_1^{\frac{\gamma-1}{2}} v^{\frac{\gamma+4}{2}} \right) \right], \quad (2)$$

где  $\theta$  – угловой размер источника, рад;  $v$  – частота, МГц;  $B$  – магнитное поле, мкГс;  $S$  – поток

излучения, Ян;  $S_1$  – поток на частоте  $\nu_1$ , выбранной в области прозрачности источника;  $\gamma$  – спектральный индекс распределения релятивистских электронов по энергиям.

На рис. 1 показано совместное влияние этих двух эффектов на ФВ, измеренную с помощью УРАН-3 на частоте 25 МГц. Кривая 1 на рисунке показывает зависимость нормированного отклика интерферометра на источник с гауссовым распределением радияркости от углового размера источника. Кривая 2 – та же зависимость с учетом угла рассеивания, вычисленного в соответствии с (1) при  $b = 90^\circ$ . Расчет самопоглощения сделан для компактного источника, расположенного на малом красном смещении  $z$ , обладающего потоком 2 Ян на частоте 1 ГГц и магнитным полем 100 мкГс. При спектральном индексе излучения  $\alpha = (\gamma - 1)/2 = 1$  и достаточно большом угловом размере такой источник в декаметровом диапазоне имел бы поток  $\sim 100$  Ян. При уменьшении углового размера источника поток на частоте 25 МГц будет уменьшаться в соответствии с выражением (2) (кривая 3). Кривая 4 отображает итоговое влияние рассмотренных эффектов на отклик интерферометра и показывает, что даже такой достаточно мощный и компактный источник имел бы при наблюдении на УРАН-3 интерференционный поток не более 30 Ян.

На практике это привело к тому, что при наблюдении 30 наиболее мощных внегалактических радиоисточников на интерферометрах УРАН, только в семи случаях были обнаружены интерференционные колебания на наиболее длинноволновых интерферометрах УРАН-3 и УРАН-4. При расширении программы исследований угловой структуры радиоисточников в декаметровом

диапазоне необходимо было наблюдать объекты с потоками, существенно меньшими 100 Ян, при этом излучение их компактных деталей, таких как “горячие пятна”, составляющее часть полного потока, оказалось бы ниже уровня обнаружения длинноволновых инструментов. Поэтому увеличение чувствительности стало для сети УРАН насущной задачей.

Для повышения чувствительности путем увеличения эффективной площади радиотелескопов требуются существенные капиталовложения и большие земельные участки. Более реальным методом является повышение радиометрического выигрыша, т. е. произведения полосы принимаемых сигналов на время когерентного накопления. На декаметровых волнах время когерентного накопления ограничено влиянием фазовых флуктуаций, вызванных воздействием ионосферы и межпланетной плазмы. Таким образом, только расширение полосы приемлемо для увеличения чувствительности интерферометров УРАН.

Для защиты от помех в интерферометрах УРАН до последнего времени использовались приемные устройства с достаточно узкой полосой приема 20 кГц [2, 3]. В отсутствие помех в полосе приема мощность сигналов на входе аналого-цифровых преобразователей (АЦП) определяется уровнем галактического фона, так как излучение основной массы исследуемых объектов, принимаемое радиотелескопами сети, ниже этого уровня. Ввиду постоянства фона при наблюдении конкретного объекта динамический диапазон суммы принимаемых сигналов был невелик, что позволяло использовать малоразрядные 2-битные АЦП [3] и уменьшало объем сохраняемых данных. При расширении полосы повышается вероятность попадания помех вещательных станций в полосу принимаемых частот, и для неискаженной передачи сигналов требуется повышение динамического диапазона приемного тракта и увеличение разрядности АЦП. Повышаются также требования к быстродействию АЦП и интерфейса сопряжения с компьютером, и существенно возрастают требования к емкости устройств хранения информации. Еще одной проблемой является частотная зависимость свойств ионосферы, которая может ограничить максимально применимую полосу приема. В соответствии с поставленными задачами мы рассмотрим проблемы определения допустимой ширины полосы пропускания, дадим краткое опи-

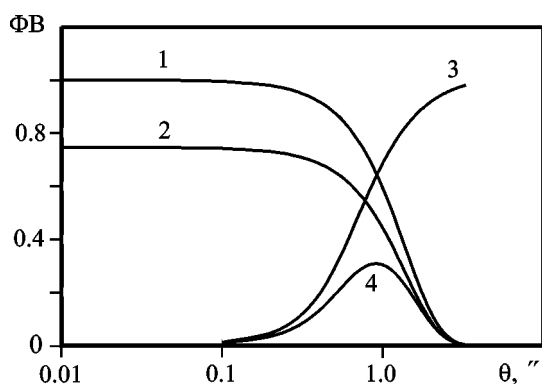


Рис. 1. Влияние рассеивания и самопоглощения излучения на величину отклика интерферометра

сание разработанной аппаратуры и соответствующего программного обеспечения, а также описание изменившейся методики измерений.

## 2. Факторы, влияющие на ограничения полосы пропускания

При расширении полосы частот принимаемых сигналов из-за дисперсии среды распространения возникают два эффекта, уменьшающие взаимную корреляцию излучения, принятого разнесенными антеннами интерферометра.

1. При распространении радиоволн в ионизированной среде, в дополнение к задержке, задаваемой геометрией “база-источник”, возникает частотозависимая дифференциальная задержка, определяемая разностью электронной концентрации по двум путям распространения сигнала. Она определяет зависящий от частоты сдвиг фазы между сигналами двух пунктов, что вызывает декорреляцию, растущую с увеличением полосы принимаемых сигналов.

2. Наличие в ионизированной среде магнитного поля приводит к повороту плоскости поляризации волны, зависящему от частоты, что вызывает уменьшение отклика интерферометра при приеме сигналов в широкой полосе, так как на разных ее участках векторы поля не параллельны.

Оба эти эффекта особенно существенны в дециметровом диапазоне, поскольку влияние ионизированной среды пропорционально квадрату длины волны.

Существовавший аппаратный комплекс интерферометров УРАН благодаря наличию двух независимых частотных каналов и возможности приема двух линейных поляризаций дал возможность напрямую измерить частотную зависимость фазовых и поляризационных характеристик и оценить вносимые ими ограничения. Для этого на УРАН-1 и УРАН-2 был проведен ряд специальных наблюдений компактного источника в Крабовидной туманности при различных частотных разносах каналов интерферометра (от 75 кГц до 5 МГц).

Фазовые зависимости можно измерить либо напрямую, определяя разность фаз в различных частотных каналах, либо измерив дисперсионную задержку при достаточном разносе частот. Проведенные эксперименты показали, что измерения фазы на существующем оборудовании сложны из-за трудности фазовой синхронизации приемников с гетеродинами в виде синтезаторов частоты

и больших значений фазового сдвига, вызывающего неопределенность, возникающую при разностях фаз, больших  $2\pi$ . Измерение дифференциальной задержки, наоборот, показали, что ее значения менее 1 мкс даже между частотными каналами 20 и 25 МГц и ее трудно определить с помощью узкополосной аппаратуры интерферометра, определяющей ширину взаимной корреляционной функции сигналов в несколько десятков микросекунд.

Более эффективным оказался метод, основанный на определении изменений угла дифференциального (вызванного разностью электронной концентрации в ионосфере над пунктами интерферометра) поворота плоскости поляризации  $\Omega$  в зависимости от частоты. При этом не требуется фазовая синхронизация приемников, а угол хотя и измеряется с точностью до квадранта, однако невелик. Используя два частотных канала, можно (считая частотную зависимость квадратичной  $\Omega \sim 1/\nu^2$ ) однозначно восстановить абсолютную величину  $\Omega$  на любой частоте. Кроме того, из этих же данных несложно получить и ограничения, связанные с дисперсией фазы сигнала в полосе приема, так как угол поворота плоскости поляризации  $\Omega$  на частоте  $\nu$  и фазовый сдвиг  $\phi$ , внесенный частотной дисперсией задержки сигналов, связаны простым соотношением  $\phi/\Omega = \nu/\nu_h$  ( $\nu_h$  – циклотронная частота, для ионосферы  $\nu_h \approx 1.4$  МГц).

Соответствующие измерения были проведены при разносах частот 1 и 5 МГц. Среднее значение измеренного поворота плоскости поляризации, пересчитанное к частоте 25 МГц, оказалось равным  $\approx 3.5$  рад и предельная полоса приема, в которой угол поворота плоскости поляризации изменится на 1 рад, вблизи 25 МГц составила  $\approx 1.5$  МГц. При этом фазовый набег, вызванный разностью электронной концентрации на частоте 25 МГц, окажется  $\phi \approx 65$  рад, а соответствующая дисперсионная задержка  $\approx 0.4$  мкс.

Соответственно ширина полосы, при которой дополнительный сдвиг спектральных составляющих на ее краях из-за влияния ионосферы составит около радиана, в окрестности частоты 20 МГц будет близка к 250 кГц, а около 25 МГц – 500 кГц. Однако в отличие от поляризационной декорреляции фазовые искажения могут быть компенсированы. Как показывают расчеты, вблизи частоты 25 МГц, при компенсации квадратичного из-

менения фазы дополнительной постоянной задержкой (с линейным изменением фазы в полосе принимаемых частот), уменьшение корреляции из-за остаточного фазового сдвига не превышает 20 % даже при ширине полосы 5 МГц и резко падает при ее сужении. Однако такая компенсация возможна только при хорошем соотношении сигнал/шум и при постоянной электронной концентрации в течение времени ее определения. При слабом же сигнале или существенном изменении электронной концентрации за время слежения, когда компенсирующая временная задержка постоянна, допустимая полоса оказывается существенно меньшей. Так, например, при повороте плоскости поляризации на 1 рад за 10 мин (такие значения наблюдаются в экспериментах довольно часто) некомпенсированная задержка ограничивает допустимую полосу значением, близким к 1.5 МГц. Очевидно, полученное значение предельной полосы будет зависеть от длины базы и конкретных условий приема и полосу приема желательно ограничить меньшим значением.

### 3. Требования к аппаратурному комплексу УРАН

Рассмотрим подробнее требования к аппаратуре приема и регистрации широкополосных сигналов исходя из необходимых полосы приема и динамического диапазона с учетом экономических и технических факторов.

Реализация аппаратуры с упомянутой выше максимальной полосой приема 1.5 МГц привела бы к ряду технических проблем. Так, даже при 8-битном АЦП (для обеспечения неискаженного приема сигналов с помехами) и четырех приемных каналах потребуется интерфейс связи с компьютером со скоростью передачи данных более 10 МБ/с. В результате накопление данных за недельный цикл ночных наблюдений потребует емкости устройств хранения в несколько терабайт для каждого пункта УРАН. Фильтрация помех и последующее уменьшение разрядности в режиме реального времени при таком потоке данных сильно затруднены. Хотя указанные максимальные требования на период проведения модернизации УРАН можно было удовлетворить, однако это привело бы к значительным техническим и экономическим трудностям. Поэтому полосу приема решено было ограничить значениями 200 ÷ 300 кГц.

Приемные устройства должны быть достаточно простыми и технологичными, пригодными для мелкосерийного изготовления, следовательно с возможно меньшим количеством настроек. Мы остановились на супергетеродинной схеме с одним верхним преобразованием частоты и промежуточной частотой (ПЧ) 10.7 МГц. При ширине полосы приема 250 кГц это дало возможность использовать простой широкополосный непереключаемый преселектор и промышленные фильтры ПЧ широкого применения с гладкими фазовыми характеристиками, а также уменьшить требования к пропускной способности интерфейса и емкости накопителей.

Как указывалось выше, при расширении полосы приема нужно учитывать динамику входных сигналов в присутствии помех и предусмотреть средства борьбы с ними.

Проведенные на УРАН-1 и УТР-2 измерения уровней помех показали, что в диапазоне от 20 до 30 МГц при полосе анализа 10 кГц уровень помех в дневное время не превышает 40 дБ от уровня галактического фона. Однако существуют две полосы частот, вблизи 21.5 и 27 МГц, в которых уровень дневных помех достигает 60 дБ. Аналогичные ночные уровни помех существенно ниже. На частотах ниже 15 МГц помехи как днем, так и ночью достигают, а иногда и превосходят уровень 60 дБ. Результаты этих измерений определили необходимость принятия следующих мер:

- осуществить предварительную частотную режекцию части диапазона, в которой измерения не ведутся;

- обеспечить высокий динамический диапазон входного усилителя и смесителя радиоприемника – более 60 дБ от уровня галактического фона;

- обеспечить достаточный динамический диапазон усилителей ПЧ и АЦП, включенного на выходе приемника, который должен превышать 30 ÷ 35 дБ (что соответствует 7–8-разрядным АЦП) чтобы помехи в полосе приема не изменяли статистических свойств сигналов и не влияли на получаемые результаты.

Ограничение полосы приема указанными выше значениями уменьшило требования к пропускной способности интерфейса связи с компьютером и емкости устройств хранения информации, позволив использовать недорогие решения. Это ограничение дало также возможность осуществить программную фильтрацию помех в режиме реального

времени и, ввиду уменьшившегося после фильтрации динамического диапазона, использовать малоразрядный код для хранения данных. Последнее еще более снизило требования к емкости устройств хранения. Так, количество данных, накопленных за недельную сессию наблюдений, не превышает 200 Гб для каждого пункта интерферометра, что вполне приемлемо при использовании современных жестких дисков для хранения и DVD для транспортировки данных в центр обработки. В то же время при проектировании была предусмотрена возможность расширения полосы, если в будущем исчезнут приведенные выше технические ограничения.

#### 4. Широкополосная аппаратура приема и регистрации сигналов

Новый аппаратный комплекс УРАН рассчитан на одновременную работу в четырех независимых каналах (две частоты, например 20 и 25 МГц, в двух ортогональных поляризациях). Его блок-схема с обозначением основных сигналов показана на рис. 2. Таким оборудованием были снабжены все пункты сети УРАН. Рассмотрим его основные компоненты.

*Радиоприемник* содержит четыре независимых канала. Каждый из них выполнен по супергетеродинной схеме с одним преобразованием частоты. Центральная частота ПЧ – 10.7 МГц. На входах приемников включен двухконтурный полосовой фильтр с батервортовской частотной характеристикой и полосой пропускания 19 ÷ 26 МГц. Его назначение – подавление сигналов зеркального канала и помех на частотах ниже 15 МГц на величину более 30 дБ. В качестве преобразователя частоты и первого усилителя ПЧ использована микросхема MC1574, объединяющая оба эти устройства в одном корпусе. В качестве

фильтров ПЧ применяются два полосовых фильтра на поверхностных акустических волнах фирмы Murata с полосой 230 кГц по уровню –6 дБ. На выходе включен усилитель ПЧ на микросхеме MC1350 с плавной регулировкой усиления в пределах 10 ÷ 30 дБ и низким выходным сопротивлением для согласования с АЦП.

*Гетеродин* построен на основе схемы с фазовой автоподстройкой частоты и состоит из схемы управления, синтезатора и генератора, управляемого напряжением (ГУН). Структурная схема гетеродина представлена на рис. 3.

Схема управления синтезатора выполнена на микроконтроллере PIC16F84A и позволяет вручную управлять частотой с шагом 10 или 50 кГц в диапазоне 30.2 ÷ 36.2 МГц (для работы приемника в диапазоне 19.5 ÷ 25.5 МГц соответственно). В конструкции зарезервированы схемные и программные ресурсы для возможного внешнего программного управления блоком по последовательному двухпроводному интерфейсу.

На вход микросхемы синтезатора ADF4001 подается сигнал опорной частоты 5 МГц от рубидиевого стандарта частоты. По последовательному интерфейсу с блока управления в эту микросхему записываются параметры режима и значения коэффициентов деления опорной (5 МГц) и выходной частот. С выходов делителей частоты сигналы с частотой сравнения 10 кГц поступают на импульсно-фазовый детектор частоты, вырабатывающий сигнал ошибки, преобразуемый в сигнал управления частотой. Сигнал управления через фильтр низких частот поступает на вход управления микросхемы ГУН MAX2605. С выходов ГУН сигнал поступает в синтезатор и на выход блока.

*Аналогово-цифровой преобразователь* содержит четыре идентичных канала преобразования сигнала, состоящие из малошумящих высо-

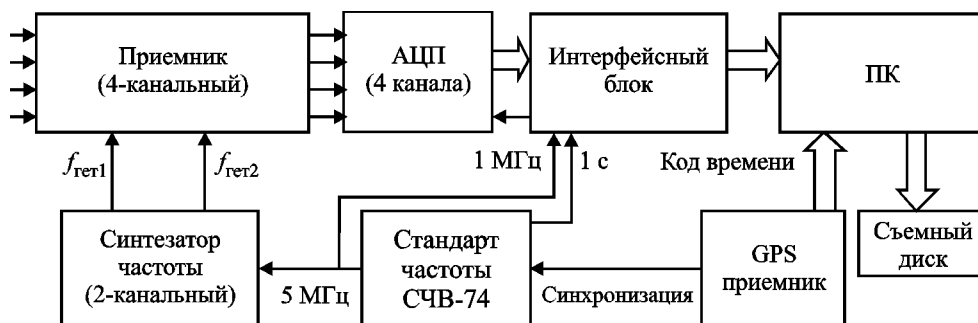


Рис. 2. Блок-схема типового аппаратного комплекса пункта УРАН

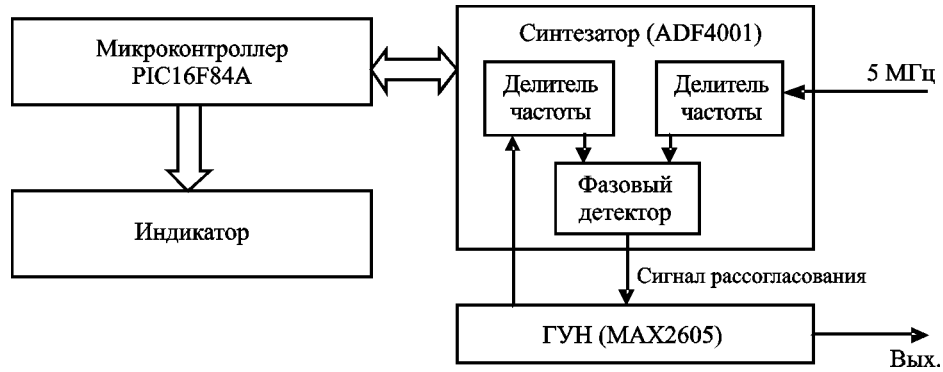


Рис. 3. Структурная схема гетеродина

кочастотных усилителей с регулируемым коэффициентом усиления (AD8032), быстродействующих АЦП (AD9051) и общей для всех каналов цифровой схемы на программируемой логической матрице (ПЛМ) EPM3128A. Функциональная схема АЦП приведена на рис. 4.

Коэффициент усиления AD8032 выбран так, чтобы при входных напряжениях  $\pm 150$  мВ обеспечить полную шкалу аналогово-цифрового преобразования. При помощи предусмотренной в AD8032 возможности активного регулирования входного импеданса его значение выбрано из расчета согласования с импедансом кабельной линии 50 Ом, а дифференциальный выход усилителя согласован с дифференциальным входом микросхемы АЦП.

Используемая микросхема AD9051 – быстродействующий 10-разрядный АЦП со схемой выборки-хранения. Частота выборок АЦП – до 60 МГц, диапазон частот входных сигналов – до 130 МГц. Очевидно, что столь высокие значения параметров излишни для выбранной полосы пропускания. Однако это сравнительно недорогое решение предоставляет широкие возможности для дальней-

шего усовершенствования аналоговой и программной частей аппаратного комплекса УРАН для расширения полосы и/или динамического диапазона.

В цифровой части схемы реализовано управление выборкой АЦП, буферизация данных и схема связи с внешним интерфейсом. Частота выборки данных выбрана 1 МГц, что обеспечивает преобразование полосы сигнала  $10.5 \div 11.0$  МГц к частотам  $0 \div 0.5$  МГц. Так как поступающий на вход АЦП сигнал предварительно проходит через фильтры ПЧ приемников, искажений, связанных с наложением спектров, практически нет. Оцифрованные данные четырех каналов передаются во внешний интерфейс 16-битными словами по два канала в одном слове. Реализация этой схемы на ПЛМ позволила менять структуру и параметры схемы управления программным путем в процессе разработки и при необходимости дальнейших изменений, например, при расширении полосы пропускания в будущем.

Интерфейсный блок предназначен для непрерывного ввода в компьютер данных, которые поступают от АЦП со скоростью 4 МБ/с. Ввод осу-

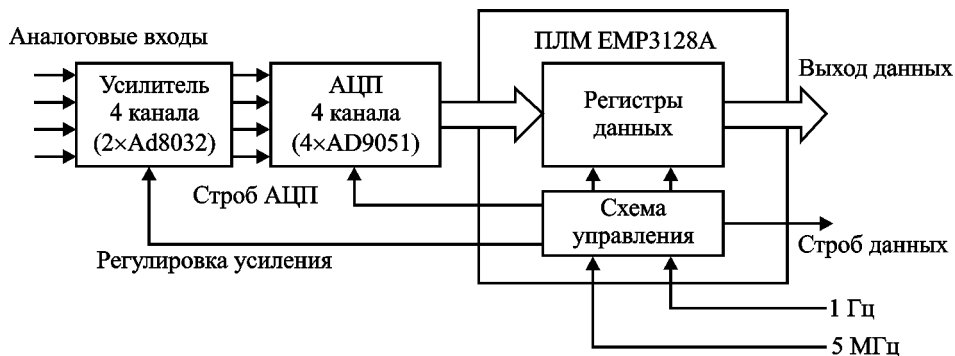


Рис. 4. Функциональная схема блока АЦП

ществляется через стандартный интерфейс IDE. Прототипом для интерфейсного блока послужила схема, описанная в [7], усовершенствованная в соответствии со специфическими требованиями регистрации в сети УРАН. Функциональная схема интерфейсного блока показана на рис. 5.

Основное требование к интерфейсному блоку – информационный поток от АЦП к компьютеру не должен прерываться и терять сколь угодно заметное количество отсчетов. Для этого интерфейс содержит два оперативно-запоминающих устройства (ОЗУ). В каждый момент времени одно из ОЗУ накапливает информацию, приходящую от АЦП. Цикл накопления занимает  $2^{14} = 16384$  мкс, за это время записывается 64 КБ данных. В этот промежуток времени второе ОЗУ занято передачей информации в оперативную память компьютера, причем собственно обмен занимает ~ 5 мс. По окончании цикла ОЗУ меняются местами – из первого информация передается в ЭВМ, а второе накапливает следующие 64 КБ. Очевидно, что возможности интерфейса также используются неполностью, и без заметных изменений частота выборок и полоса могут быть удвоены.

Схема временной привязки является одной из важнейших подсистем аппаратного комплекса интерферометра с независимой регистрацией сигналов. Ее необходимая точность – малая доля обратной ширины полосы пропускания, в данном случае она была принята равной  $\pm 1$  мкс.

Как видно из блок-схемы комплекса (рис. 2), ее элементами являются рубидиевый стандарт частоты и времени СЧВ-74 (с относительной стабильностью не хуже  $3 \cdot 10^{-11}$ , т. е. ~ 3 мкс за сутки) и приемник сигналов спутниковой навигационной системы GPS. В функции последнего входят, в частности, выдача кода всемирного времени с точностью в единицы миллисекунд и секундных меток, привязанных к шкале времени с точностью до долей микросекунды. СЧВ-74 выдает также опорную частоту для синхронизации местных гетеродинов и тактовой частоты АЦП и является хранителем местной шкалы времени. Текущее время, определенное с помощью GPS, синхронизирует внутренние часы компьютера.

Система временной привязки в сети УРАН является многоступенчатой, базирующийся на аппаратных и программных средствах. Перед сеансом наблюдений шкала секунд стандарта частоты синхронизируется аппаратно секундными метками GPS, а внутренние часы компьютера привязываются программно к всемирному времени по GPS-приемнику. Так как долговременная стабильность часов компьютера невелика (порядка нескольких секунд за сутки), то один раз в час запрашивается время GPS и запоминается вместе с показаниями внутренних часов. Секундные метки местной шкалы от стандарта частоты поступают в блок АЦП и сбрасывают счетчики ПЛМ, управляющие выборкой. Первое

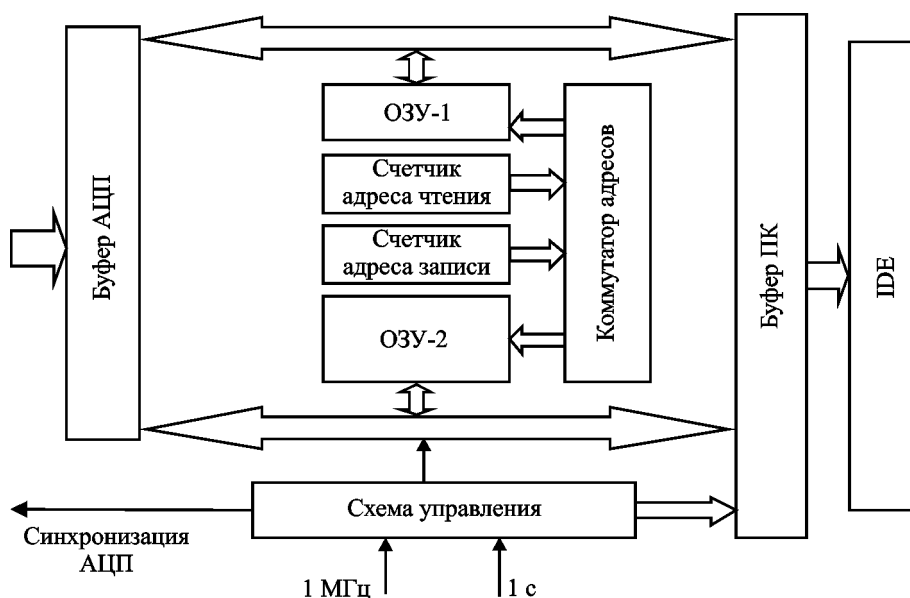


Рис. 5. Функциональная схема интерфейсного блока

слово данных, полученное после этого, устанавливается равным нулю и используется затем в качестве метки времени для синхронизации потока данных. В следующее слово данных записывается номер этой секундной метки, сформированный внутренним счетчиком, длиной 15 бит. На интерфейсной плате формируется номер блока данных длиной 64 КБ, который запоминается вместе с временем приема очередного блока компьютером. Этих мер достаточно для восстановления временной привязки полученных отсчетов даже при пропуске блоков, например, из-за задержек в работе компьютера.

## 5. Программное обеспечение комплекса регистрации сигналов

Как показано выше, существенная часть операций, связанных с регистрацией сигналов, выполняется на программном уровне. Кроме привязки отсчетов к единой шкале времени, программным путем в режиме реального времени производятся следующие процедуры:

- устранение неравномерности частотной характеристики приемников,
- ограничение полосы принятого сигнала значением 250 кГц,
- фильтрация узкополосных помех,
- измерение уровня сигнала и нормировка к нему регистрируемого процесса,
- преобразование принятых сигналов к 2-битному представлению,
- приведение сигналов к стандартному формату и запись их на жесткий диск.

Для устранения неравномерности частотной характеристики приемников перед началом наблюдений проводится ее калибровка. Для этого на вход приемников подается сигнал от шумового генератора с плоским в пределах полосы ПЧ спектром и вычисляется огибающая спектра выходного сигнала  $F(\nu)$ . Зависимость  $F_0(\nu)$ , равная  $1/F(\nu)$  в пределах полосы 250 кГц вблизи максимума спектра сигнала и нулю вне этой полосы, запоминается в качестве характеристики корректирующего фильтра.

В ходе наблюдений производится преобразование Фурье сигналов из введенных блоков длиной 64 КБ (~16 мс) и каждый из полученных спектров перемножается с частотной характеристикой корректирующего фильтра  $F_0(\nu)$  для образования спектра с прямоугольной огибающей.

Полученные спектры сохраняются в ОЗУ компьютера в течение ~1 с, а их модули накапливаются за это время. Накопленные модули спектров анализируются, с тем чтобы выявить частотные области, амплитуда составляющих в которых отличается от среднего значения во всей полосе более чем на  $4\sigma$  ( $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение), и по этим данным строится еще один фильтр, с помощью которого вырезаются пораженные узкополосными помехами области. Сохраненные в ОЗУ спектры также домножаются на частотную характеристику этого фильтра. На рис. 6 показаны изображения окон программы, производящей такую фильтрацию в режиме реального времени.

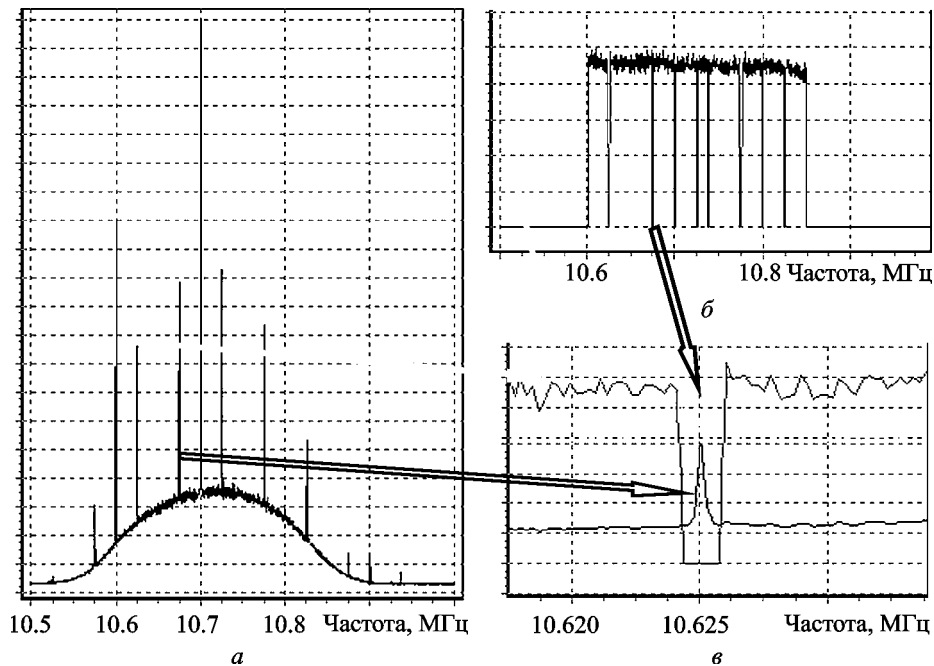
Для каждого блока вычисляется среднее значение сигнала, и образовавшиеся на месте помех пустые участки спектра заполняются белым шумом этой интенсивности. После обратного фурье-преобразования спектра полученный сигнал нормируется на среднюю мощность, а его реальная часть квантуется по уровням с уменьшенной вдвое (в соответствии с ограниченной до 250 кГц полосой) тактовой частотой, давая 2-битные сигналы, которые объединяются по четырем приемным каналам в однобайтный код. В результате такого переквантования каждый 64-килобайтный блок сжимается до 8 КБ. Каждый такой блок снабжается меткой времени и вместе с четырьмя полноразрядными отсчетами мощности сигнала (по одному на канал) сохраняется в файл для последующей корреляционной обработки сигналов, записанных в разных пунктах сети УРАН. Для возможности дальнейшего анализа спектров принятых сигналов и учета потерь за счет вырезания помех периодически в тот же файл записывается вся информация о накопленных спектрах.

## 6. Методика наблюдений

Ввиду специфики декаметрового диапазона определение нормированной ФВ радиисточников с помощью интерферометров УРАН ранее базировалось на определении отношения выходного продукта коррелятора к мощности сигналов источника, принятых каждой из антенн [2, 3]. Это требовало наличия радиометров в составе аппаратного комплекса и порождало определенные проблемы.

Новая методика определения ФВ заключается в вычислении отношения корреляционного сиг-





**Рис. 6.** Фильтрация входных сигналов: *а* – спектр сигнала ПЧ на выходе приемника с узкополосными помехами; *б* – спектр сигнала с вырезанными помехами и скорректированной частотной характеристикой; *в* – растянутый участок спектра с помехой, совмещенный с тем же участком после фильтрации (масштаб по вертикали разный)

нала длиннобазовых интерферометров к сигналу интерферометра с настолько малой базой, что ФВ на ней заведомо равна единице. В качестве такового используется интерферометр, образованный плечом Север–Юг телескопа УТР-2 [8] и двумя секциями антенны Запад–Восток того же инструмента. При этом, поскольку сигналы от антенны Север–Юг входят в отклики как длиннобазового, так и короткобазового интерферометров, снимаются искажения и расчетные поправки, связанные с изменением параметров этой антенны, наиболее сложной в сети УРАН, а также устраняется влияние мерцаний и рефракции, вызванных воздействием ионосферы на сигналы, принятые этой антенной. Применение такой методики, кроме всего прочего, стало возможным благодаря отказу от аналоговых и переходу к использованию цифровых корреляторов, не требующих калибровки.

Еще одно усовершенствование связано с методикой наблюдений. Ранее запись велась сканами с фиксированной длительностью 20 мин. Их длина определялась необходимостью попадания в скан заметной части диаграммы направленности (ДН) телескопа, чтобы затем, посредством вписывания расчетной ДН, определить положения ее нулей и максимума. Это делалось для

определения существенного для небольших антенн УРАН смещения нулей радиометров, вызванного влиянием помех, и смещения ДН по времени из-за влияния рефракции, особенно заметного для решетки Север–Юг радиотелескопа УТР-2, обладающей наиболее узкой ДН. При этом длительность информативной для интерферометра части скана, использовавшейся для нахождения ФВ, определялась временем прохождения источника через центральную часть главного лепестка ДН антенны Север–Юг и была невелика. Новая методика определения ФВ, в значительной мере свободная от такого искажающего влияния помех и рефракции, дает возможность сократить длину скана до размера его информативной части. При этом можно либо увеличить количество сканов одного источника (отсчетов на UV плоскости), либо, если нет такой необходимости, в одном интервале времени наблюдать несколько источников, перемежая их сканы. Оценки скорости изменения модуля ФВ для типичных внегалактических радиоисточников на базах интерферометров УРАН показали, что уменьшать период сканирования нет необходимости. Ширина информативной части скана, которая определяется ДН УТР-2, составляет  $4 \div 10$  мин в зависимости от склонения и часового угла источника.

Приняв компромиссную длину скана равной ~ 7 мин, при том же периоде повторения сканов каждого объекта ~ 20 мин можно наблюдать три радиисточника “одновременно”, чередуя их сканы. Это, в конечном итоге, также увеличило потенциал сети УРАН.

## 7. Заключение

Разработанный комплекс оборудования был внедрен на всех радиотелескопах сети УРАН в 2006 г. Проведенные наблюдения подтвердили правильность заложенных решений и показали высокую эффективность нового комплекса, выразившуюся в увеличении количества и повышении качества получаемых данных. За прошедшее время, большая часть которого совпала с годами минимума солнечной активности, проведены наблюдения более 80 внегалактических радиисточников с плотностью потока более 30 Ян. Каждый объект при этом наблюдался не менее чем в трех сессиях продолжительностью до семи дней каждая. Отметим, что при проведении наблюдений с помощью старого аппаратурно-программного комплекса, ввиду его существенно меньшей эффективности достаточным считалось наблюдать каждый объект в течение 5 ÷ 7 дней.

Повышение чувствительности вследствие расширения полосы приема дало следующий выигрыш: у более чем 70 % исследуемых объектов наблюдались интерференционные колебания на наибольшей из баз – УРАН-3. При этом у значительной части радиисточников, которые наблюдались ранее с помощью узкополосной аппаратуры, теперь регистрируются интерференционные отклики на длинных базах. Для иллюстрации возросшего в результате модернизации отношения сигнал/шум на рис. 7 приведен пример интерференционных колебаний, полученных на частоте 25 МГц при наблюдении радиогалактики 3С 280 на интерферометре УРАН-2 с использованием старого узкополосного (верхняя панель) и нового широкополосного (нижняя панель) аппаратурного комплексов. Частота интерференционных колебаний искусственно сдвинута к 0.1 Гц. Коррелированный поток источника на этой базе оценен в ~ 40 Ян.

Отметим также, что невысокая чувствительность узкополосного комплекса аппаратуры позволяла (для подавляющего большинства исследуемых объектов) получать интерференционные

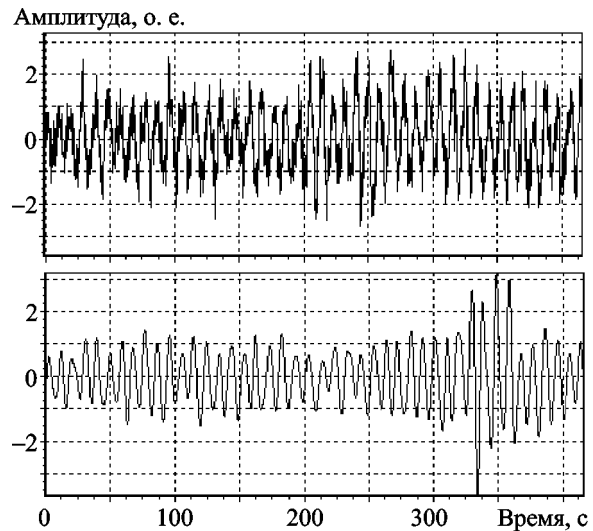


Рис. 7. Интерференционные колебания, полученные при наблюдении 3С 280 с использованием узкополосного и широкополосного интерферометров

отклики только между парами пунктов, включающими наибольшую антенну сети – решетку Север–Юг радиотелескопа УТР-2. Это давало возможность иметь в сети УРАН, состоящей из пяти радиотелескопов, лишь четыре базы интерферометров. Следствием возросшей чувствительности комплекса стало появление трех дополнительных интерферометрических баз, включающих УРАН-2 – второй по величине радиотелескоп сети. В ряде случаев интерферометрические отклики получены и на базе УРАН-3 – УРАН-4. Улучшение заполнения UV плоскости, в свою очередь, привело к повышению качества восстановления распределения яркости исследуемых объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мень А. В., Брауде С. Я., Рашковский С. Л., Шарыкин Н. К., Шепелев В. А., Инютин Г. А., Христенко А. Д., Булацен В. Г., Браженко А. И., Кошевой В. В., Романчев Ю. В., Цесевич В. П., Галанин В. В. Система декаметровых радиointерферометров УРАН (ч. I). Основные принципы. Обзор // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 4. – С. 385–401.
2. Бовкун В. П., Мень А. В. Интерферометрические наблюдения на декаметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. – 1983. – Т. 26, № 11. – С. 1357–1370.
3. Мень А. В., Рашковский С. Л., Шепелев В. А., Белов А. С., Шевченко В. В. Система декаметровых радиointерферометров УРАН (ч. II). Аппаратура и методика наблюдений // Радиофизика и радиоастрономия. – 1998. – Т. 3, № 3. – С. 284–293.

4. Рашковский С. Л. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. III). Методика и алгоритмы обработки результатов экспериментов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 20–28.
5. Мень А. В., Рашковский С. Л., Шепелев В. А. Система декаметровых радиоинтерферометров УРАН (ч. IV). Моделирование структуры источников // Радиофизика и радиоастрономия. – 2001. – Т. 6, № 1. – С. 9–20.
6. Шишов В. И. Турбулентная межзвездная плазма и сверхвысокое разрешение в радиоастрономии // Астрон. ж. – 2001. – Т. 78, № 3. – С. 229–237.
7. Антюфеев А. Использование интерфейса АТА для связи с внешними устройствами // Схемотехника. – 2004. – № 1. – С. 42–45.
8. Брауде С. Я. Мень А. В., Содин Л. Г. Радиотелескоп декаметрового диапазона волн УТР-2 // Антенны. – Москва: Связь. – 1978. – Вып. 26. – С. 3–14.

*С. Л. Рашковський<sup>1</sup>, О. С. Бєлов<sup>1</sup>, О. С. Іванов<sup>1</sup>,  
А. В. Лозинський<sup>2</sup>, В. О. Шепєлев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка  
НАН України,  
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79601, Україна

#### НОВИЙ АПАРАТУРНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС УРАН

Радіоприймальні пристрої інтерферометрів УРАН, що застосовувались раніше, зі смугою пропускання 20 кГц дозволяли виконувати спостереження за умов високого рівня завад у декаметровому діапазоні, проте суттєво обмежували кількість спостережуваних радіоджерел. У цій роботі обґрунтовано необхідність розширення смуги приймання

для підвищення чутливості мережі УРАН. Розглянуто фізичні та технічні обмеження на ширину смуги, визначено вимоги до нової апаратури інтерферометрів для приймання та реєстрації сигналів. Описано новий апаратурний комплекс з розширеною до 250 кГц смугою реєстрації сигналів та програмною фільтрацією завад. Наведено розроблену методику спостережень, що дозволила покращити точність та продуктивність інтерферометричних спостережень.

*S. L. Rashkovskiy<sup>1</sup>, A. S. Belov<sup>1</sup>, A. S. Ivanov<sup>1</sup>,  
A. B. Lozinskiy<sup>2</sup>, and V. A. Shepelev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine,

4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>Karpenko Physico-Mechanical Institute,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
5, Naukova St., Lviv, 79601, Ukraine

#### THE URAN'S NEW FACILITIES AND SOFTWARE

The early radio receivers of the URAN interferometers with a bandwidth of 20 kHz allowed observations under strong interferences at decameter wavelengths, but essentially limited the number of radio sources observed. Necessity of the pass-band expanding to improve the URAN network sensitivity has been proved in this paper. We consider physical and technical restrictions on bandwidth expanding, and define the requirements for new receivers and recorders of the interferometers. Newly constructed facilities with extended up to 250 kHz bandwidth and software rejection of interferences are described. A method of observation for improving an accuracy and performance of interferometer measurements have been developed.

*Стаття поступила в редакцію 20.07.2012*