

## РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОРРЕЛЯТОР ДЛЯ КОМПЛЕКСА “КВАЗАР-КВО”

© 2011 г. И. Ф. Суркис, В. Ф. Зимовский, В. А. Шантырь, А. Е. Мельников

*Институт прикладной астрономии РАН*

*Россия, 197110, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 8*

Поступила в редакцию 23.07.2010 г.

В ИПА РАН для радиоинтерферометрического комплекса “Квазар-КВО” разработан коррелятор, соответствующий современным требованиям по обработке наблюдений радиоинтерферометра со сверхдлинными базами (р.с.д.б.). Коррелятор способен обрабатывать потоки данных от каждой станции до 1 Гбит/с. Максимальное количество одновременно обрабатываемых станций – 6, баз – 15. Коррелятор оснащен системами воспроизведения Mark5B, что позволяет проводить р.с.д.б.-сеансы в режиме квазиреального времени. В аппаратно-программном корреляторе реализован XF-алгоритм обработки. Аппаратно вычисляются кросскорреляционные функции и выделяются сигналы генераторов пикосекундных импульсов станций. В настоящее время коррелятор используется при обработке всех проходящих по отечественным программам р.с.д.б.-наблюдений комплекса “Квазар-КВО”.

### ВВЕДЕНИЕ

Комплекс “Квазар-КВО” [1, 2], предназначенный для радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (р.с.д.б.), должен быть оснащен современным коррелятором с высокой точностью вычисления групповых задержек радиосигналов. Корреляция данных в р.с.д.б. представляет собой сложную научно-техническую задачу. Длина базы в р.с.д.б. составляет сотни и тысячи километров (например, длина базы Бадары–Зеленчукская комплекса “Квазар-КВО” свыше 4000 км). Принимаемые на радиотелескопах (плечах интерферометра) сигналы имеют смещение по времени относительно друг друга и доплеровское смещение спектра вследствие вращения Земли. При этом величины смещений и по времени, и по доплеровской частоте не являются постоянными и даже на внутрисекундных интервалах требуют интерполяции полиномами, по крайней мере, второго порядка (для доплеровского смещения – интерполяции фазы).

Сигнал внегалактического источника квазара является широкополосным белым шумом. Для получения необходимого соотношения сигнал/шум регистрация ведется в широкой полосе пропускания, с оцифровкой сигналов однобитовым или двухбитовым квантованием. Для точного вычисления задержек регистрация сигнала ведется одновременно в нескольких частотных каналах; после корреляционной обработки производится синтез информации разных частотных каналов. Для вычисления ионосферной задержки в геодезических исследованиях наблюдения проводятся в двух частотных диапазонах: 3.5 см (8 частотных

каналов) и 13 см (6 частотных каналов). Ширина полосы пропускания каждого канала может достигать 16 МГц при двухбитовом квантовании, результирующий поток данных каждого радиотелескопа достигает 1 Гбит/с. Вся эта информация поступает в р.с.д.б.-коррелятор. Наблюдения ведутся одновременно на нескольких радиотелескопах, образующих набор баз.

Совершенно очевидно, что р.с.д.б.-коррелятор является сложным и дорогим устройством. До недавнего времени только США и Япония разрабатывали и изготавливали р.с.д.б.-корреляторы. В настоящее время основной объем р.с.д.б.-данных в мире обрабатывается корреляторами модели MarkIV американского производства.

По мере введения в эксплуатацию радиотелескопы комплекса “Квазар-КВО” начинали работать в международных р.с.д.б.-сетях с первичной обработкой данных в корреляционных центрах США и Германии на корреляторах MarkIV. С августа 2006 г. также проводились наблюдения по отечественным р.с.д.б.-программам с первичной обработкой данных на корреляторе МикроПарсек, разработанном в ИПА РАН [3]. Однако в связи с использованием в корреляторе МикроПарсек устаревших систем записи и воспроизведения р.с.д.б.-сигналов S2, суммарный поток данных от каждой станции не превышал 64 Мбит/с, что существенно ограничивало возможности комплекса, снижая точность вычислений групповой задержки.

Для обеспечения необходимой точности работы комплекса “Квазар-КВО” разработан коррелятор АРК (астрометрический радиоинтерферо-

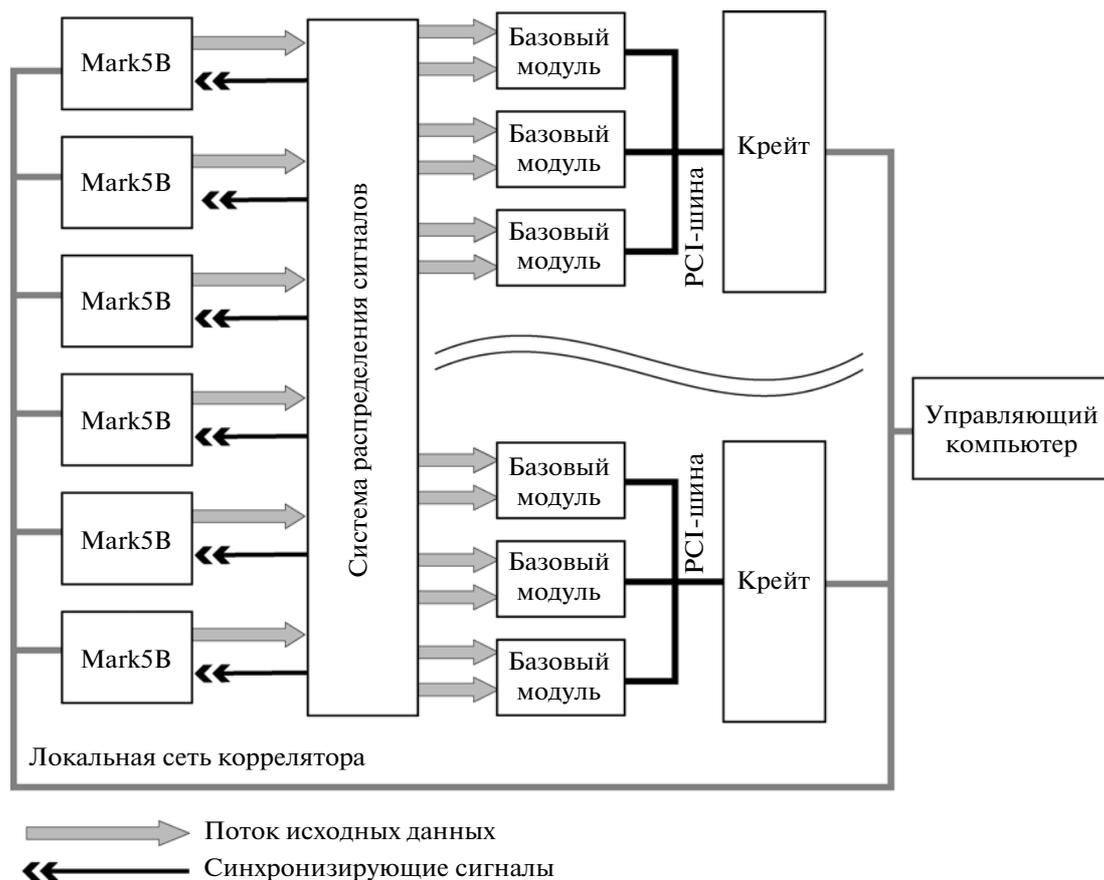


Рис. 1. Структура аппаратного обеспечения коррелятора АРК.

метрический коррелятор) [3, 4], не уступающий современным зарубежным аналогам.

Коррелятор обрабатывает входные потоки данных в формате VSI-N и укомплектовывается работающими в этом формате системами воспроизведения р.с.д.б.-сигналов модели Mark5B [5]. Эти устройства с хранением данных на жестких дисках отвечают всем современным требованиям и получают все большее распространение в международных р.с.д.б.-сетях. Использование устройств Mark5B позволяет передавать данные по волоконно-оптическим линиям связи, реализуя режим р.с.д.б.-наблюдений в квазиреальном времени.

Коррелятор обрабатывает потоки данных до 1 Гбит/с от каждой станции, что позволяет использовать ширину полосы пропускания частотных каналов станций до 16 МГц и двухбитовое квантование, и в результате достичь современной точности определения задержек.

#### СТРУКТУРА АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОРРЕЛЯТОРА

Коррелятор является аппаратно-программной вычислительной системой. Аппаратное обеспечение коррелятора разработано таким образом,

что позволяет комплектовать корреляторы различной производительности — от обрабатывающего одновременно сигналы двух станций (одной базы) до обрабатывающего одновременно сигналы шести станций (пятнадцати баз).

Введенный в эксплуатацию коррелятор комплекса “Квазар-КВО” является 6-станционным. Аппаратное обеспечение коррелятора включает в себя 6 устройств воспроизведения р.с.д.б.-сигналов Mark5B, систему распределения сигналов, 15 базовых модулей коррелятора, 5 промышленных компьютеров стандарта Compact PCI 6U (крейтов) и управляющий персональный компьютер (см. рис. 1) [4, 6]. Аппаратура 6-станционного коррелятора, кроме управляющего персонального компьютера, занимает четыре 19-дюймовые стойки. Устройства Mark5B, являющиеся промышленными компьютерами со специальным аппаратным и программным обеспечением, крейты и управляющий компьютер связаны локальной сетью коррелятора.

В процессе обработки сканов система распределения сигналов генерирует синхронизирующие сигналы — тактовый и секундный стробы — и посылает их в устройства Mark5B для точной синхронизации устройств Mark5B между собой. Выход-

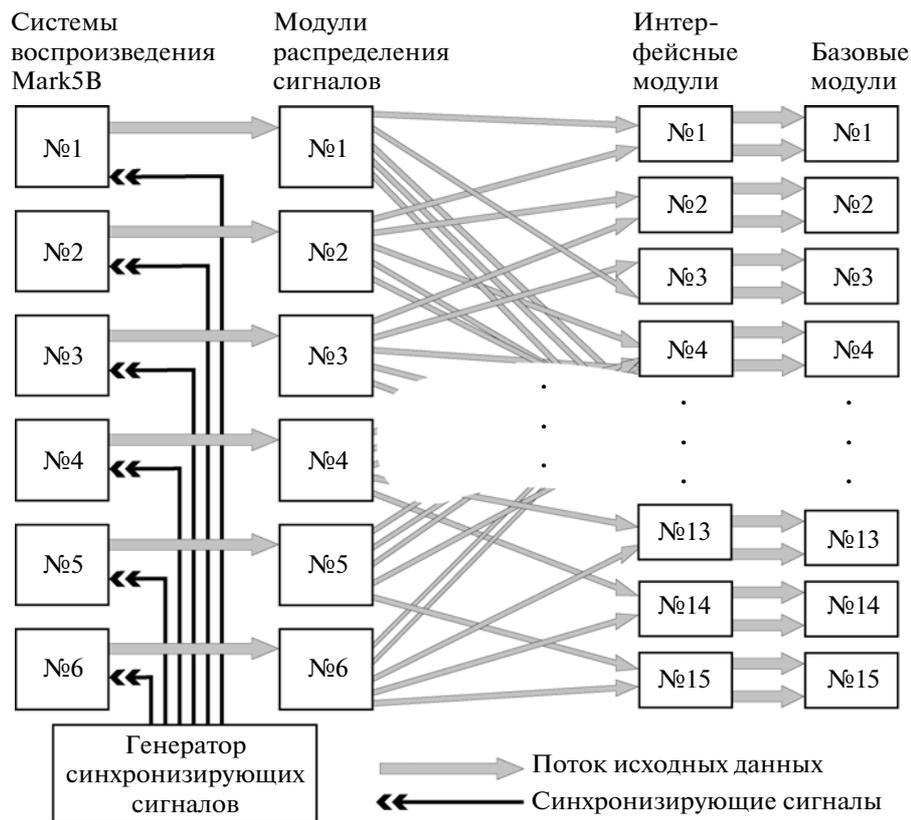


Рис. 2. Структурная схема системы распределения сигналов 6-станционного коррелятора.

ной поток данных устройств Mark5B поступает в систему распределения сигналов и передается на базовые модули таким образом, что на каждый базовый модуль поступают сигналы от двух станций.

Конструктивно базовые модули представляют собой платы стандарта CompactPCI 6U и устанавливаются в крейты. Один модуль обрабатывает данные одной базы. Базовые модули выполняют все аппаратно реализуемые вычисления коррелятора. Результат работы базового модуля – кросскорреляционные функции сигналов и сигналы генераторов пикосекундных импульсов – передаются в центральный процессор крейта через PCI-шину крейта.

### СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

Система распределения сигналов осуществляет синхронизацию устройств Mark5B и передачу данных от Mark5B к базовым модулям.

Система включает в себя модули трех типов: генератор синхронизирующих сигналов, модуль распределения сигналов и интерфейсный модуль коррелятора. Конструктивно модули являются платами стандарта Compact PCI 6U.

Генератор синхронизирующих сигналов формирует тактовые сигналы и секундный строб.

Сигналы генератора поступают на вход устройств Mark5B, осуществляя их точную синхронизацию.

Модуль распределения сигналов получает входной поток данных устройства Mark5B и копирует его на пять своих выходов. С целью оптимизации интерфейса параллельный 32-разрядный поток данных Mark5B преобразуется в последовательный 4-разрядный, что позволяет передавать его по обычным кабелям “витая пара” 6-й категории.

Интерфейсный модуль получает сигналы от двух модулей распределения сигналов, преобразует сигналы обратно к параллельному виду и через расширительную плату крейта передает в базовый модуль.

Система распределения сигналов 6-станционного коррелятора АК (рис. 2) содержит один генератор синхронизирующих сигналов, 6 модулей распределения сигналов и 15 интерфейсных модулей.

### БАЗОВЫЙ МОДУЛЬ КОРРЕЛЯТОРА

Базовый модуль (рис. 3) является ядром коррелятора и выполняет всю аппаратно реализуемую обработку данных. В базовом модуле реализован алгоритм XF [7, 8] обработки р.с.д.-сигналов.

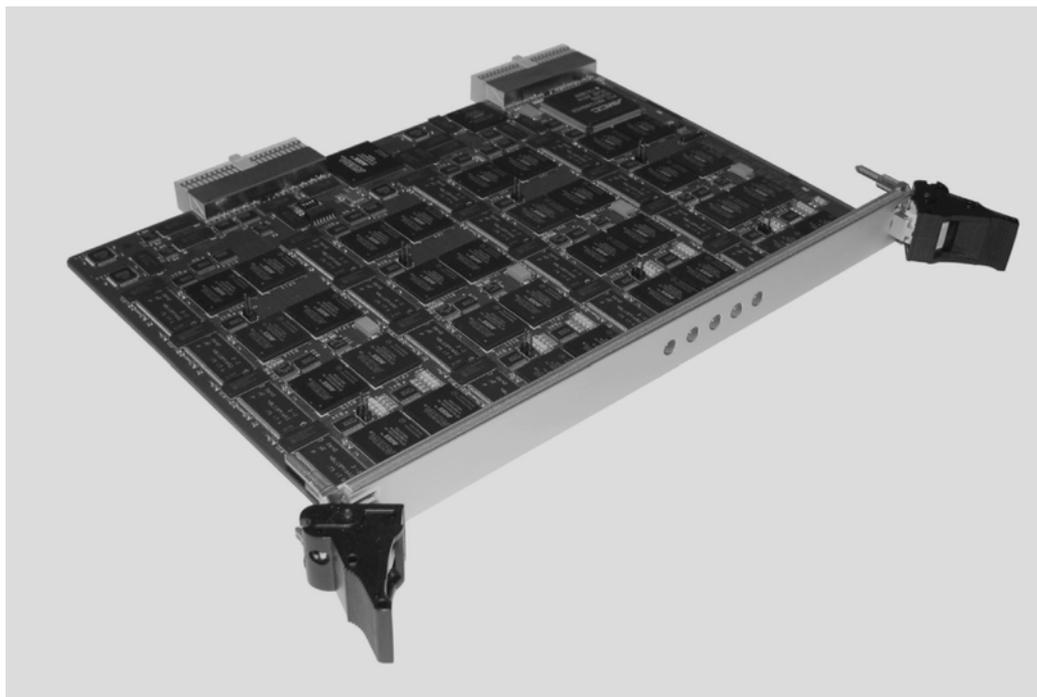


Рис. 3. Базовый модуль коррелятора.

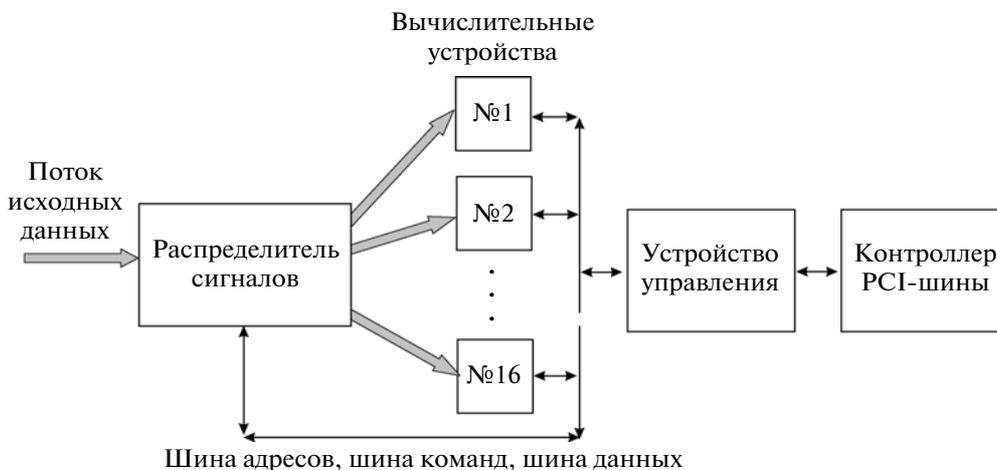


Рис. 4. Структурная схема базового модуля коррелятора.

Модуль включает в себя распределитель сигналов, 16 вычислительных устройств, устройство управления и контроллер PCI-шины (см. рис. 4).

Устройство управления и распределитель сигналов построены на основе программируемых логических интегральных схем (п.л.и.с.).

Устройство управления связано с распределителем сигналов и вычислительными устройствами шиной данных, шиной команд и шиной адресов, а через PCI-шину – с центральным процессором крейта. Устройство управления получает от центрального процессора крейта и передает на

исполнительные устройства команды настройки, старта и стопа, данные для сопровождения р.с.д.б.-сигналов по задержке и доплеровской фазе. В обратную сторону передаются результаты корреляции.

Распределитель сигналов фактически является мультиплексором, распределяющим входной поток данных по вычислительным устройствам так, что каждое вычислительное устройство принимает р.с.д.б.-сигналы одного частотного канала двух станций.

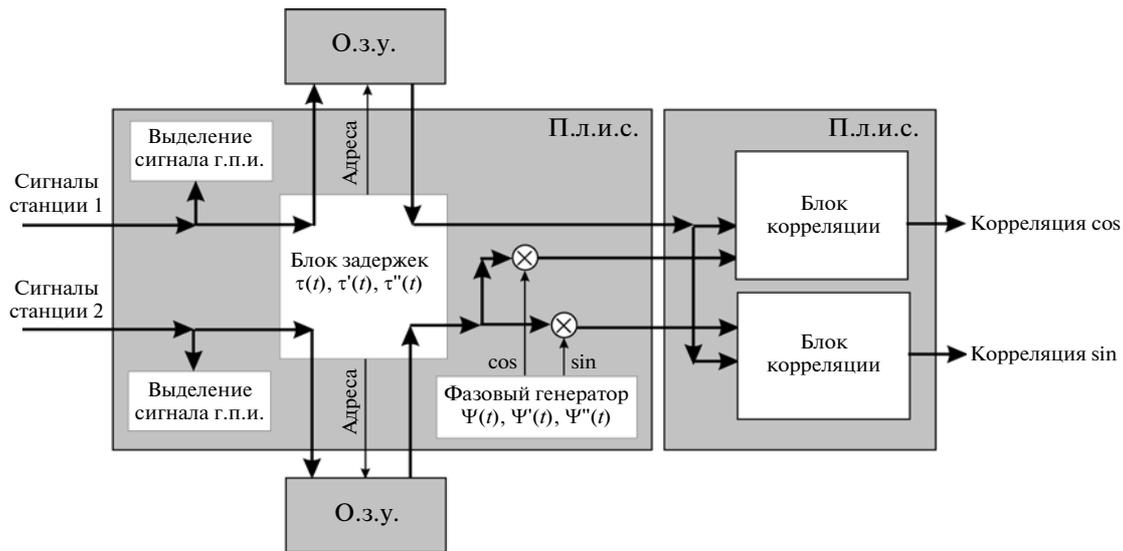


Рис. 5. Структурная схема вычислительного устройства.

Вычислительное устройство (рис. 5) включает в себя две п.л.и.с. и две микросхемы о.з.у. (оперативное запоминающее устройство).

Первая п.л.и.с., управляющая обоими о.з.у., выполняет функции сопровождения р.с.д.б.-сигналов по задержке и доплеровской фазе и выделения сигналов генераторов пикосекундных импульсов обеих станций. Сопровождение р.с.д.б.-сигналов производится в течение периода модели длительностью от 0.1 до 5 с. Задержка и доплеровская фаза в течение периода модели аппроксимируются полиномами второго порядка. На начало каждого периода модели блок получает предвычисленные значения задержки и доплеровской фазы и их первых двух производных.

На основе о.з.у. организованы два буфера входящих сигналов станций. Специальный блок сопровождения по задержке вычисляет адреса записи и чтения обоих о.з.у., смещая один сигнал относительно другого на необходимое количество тактов. В блоке сопровождения по доплеровской фазе сигналы одной из станций домножаются на косинус и синус фазового генератора (фазовращателя).

Блоки выделения сигналов генераторов пикосекундных импульсов (г.п.и.) вычисляют корреляцию сигнала станции, а также косинуса и синуса фазы фазовращателя постоянной частоты.

Вторая п.л.и.с. выполняет вычисление кросскорреляционных функций сигналов. Она содержит два блока, каждый из которых вычисляет кросскорреляции для 64 значений задержки. Один из блоков вычисляет косинусные кросскорреляции, второй – синусные, вместе формируя комплексную кросскорреляционную функцию.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОРРЕЛЯТОРА

Программное обеспечение включает в себя систему формирования задания на обработку, эфемеридное обеспечение, систему управления аппаратурой коррелятора и систему постпроцессорной обработки.

Процесс обработки р.с.д.б.-данных проходит в три этапа.

На первом этапе обработки серии р.с.д.б.-наблюдений специальным программным обеспечением формируется задание на обработку, содержащее перечень обрабатываемых сканов, несущие частоты частотных каналов, режимы работы и другие сведения. Исходными данными для системы формирования задания являются файл планирования р.с.д.б.-наблюдений системы SKED и log-файлы управляющих компьютеров станций с программным обеспечением MarkIV Field System.

Эфемеридное программное обеспечение вычисляет предварительные значения геометрических задержек. Для каждого скана и каждой базы вычисляются значения задержек для каждой секунды времени, что позволяет с высокой точностью выполнять интерполяцию сигналов и их производных на внутрисекундных интервалах времени. Эфемеридное программное обеспечение реализовано на основе пакета вторичной обработки р.с.д.б.-данных Quasar.

На втором этапе обработки производится аппаратное вычисление кросскорреляционных функций сигналов и выделение сигналов г.п.и. При этом установленное на крейтах специальное программное обеспечение осуществляет управление базовыми модулями и устройствами Mark5B. Устройствам посылаются команды настройки режима работы,

стартовые и стоповые команды, считываются состояния устройств. Базовые модули периодически получают данные для сопровождения сигналов по задержке и доплеровской фазе — значения задержки и доплеровской фазы и их первые и вторые производные. Периодически с базовых модулей снимаются результаты вычислений.

Связь с базовыми модулями осуществляется через PCI-шину крейта. Связь с устройствами Mark5B, синхронизация работы крейтов и связь крейтов с управляющим компьютером производится через локальную сеть коррелятора.

На третьем этапе обработки по полученным кросскорреляционным функциям и сигналам г.п.и. производится вычисление точных значений групповых задержек [9].

В результате работы аппаратных средств коррелятора вычисляются кросскорреляционные функции сигналов и фазы г.п.и. Эти данные вычисляются через равные промежутки времени — периоды накопления  $T$  для каждого частотного канала для диапазонов 3.5 см и 13 см. Тактовая частота (частота оцифровки) у всех частотных каналов одинакова и равна  $F_r$ , несущая частота (начало видеополосы)  $k$ -го канала —  $F_k$ .

Таким образом, в результате обработки одного скана одной базы образуется двумерный массив кросскорреляций  $c_{k,n,j}$ , каждый элемент которого — комплексное число — косинусная и синусная составляющие кросскорреляционной функции.

Измерение массива  $n$  соответствует различным номерам периодов накопления  $t$ , измерение  $j$  — различным номерам бит (задержек)  $\tau$ , одновременно вычисляемых для каждого периода накопления,  $k$  обозначает номер частотного канала. Индексы изменяются в диапазонах  $n = [0 \dots N - 1]$ ,  $j = [0 \dots J - 1]$ ,  $k = [0 \dots K - 1]$ , где  $N$  — количество периодов накопления,  $J$  — заданное конструкцией аппаратуры коррелятора количество одновременно вычисляемых задержек,  $K$  — количество частотных каналов.

Кроме того, образуется массив фаз г.п.и. первой и второй станций  $\varphi_{k,n,1}$  и  $\varphi_{k,n,2}$ .

Вначале анализируются фазы г.п.и. и корреляционные отклики в каждом частотном канале.

Фаза г.п.и. одного частотного канала одной станции в течение скана обычно представляет собой слабо наклоненную слегка зашумленную линию; наклон линии обычно не превышает  $90^\circ$  за 1000 с, ширина шумовой дорожки не превышает  $5^\circ$ . Большая ширина шумовой дорожки или нелинейность тренда свидетельствуют об ухудшении характеристик видеоконвертора (преобразователя частотного канала), равномерный разброс фазы во всем диапазоне от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$ , нулевые или равные  $\pm 180^\circ$  значения фаз в течение скана —

о полной неисправности или отсутствии видеоконвертора.

Далее для каждого частотного канала выполняется преобразование Фурье вдоль оси времени массива кросскорреляций по формуле

$$F_{k,m,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} c_{k,n,j} e^{-i2\pi nm/N}.$$

Для каждого частотного канала получается двумерный массив комплексных чисел. При этом  $m$  является номером частоты интерференции, расстояние между точками по частоте интерференции составляет  $1/TN$ . От 0 до  $(N/2) - 1$  идут положительные частоты, от  $N/2$  до  $N - 1$  — отрицательные. Для удобства работы отрицательная часть спектра переносится в начало массива. В результате нулевая частота соответствует индексу  $m = N/2$ , минимальная частота  $-1/(2T)$  — индексу  $m = 0$ , максимальная частота  $1/(2T)$  — индексу  $m = N - 1$ .

Амплитуды комплексных чисел массива  $F_{k,m,j}$ , вычисляемые как корень квадратный из суммы квадратов вещественной и мнимой составляющих элемента массива, образуют двумерный массив вещественных чисел. Корреляционный отклик частотного канала в этом массиве представляется в виде пика на фоне шумовой подложки. Величина пика является амплитудой корреляционного отклика  $A_k$ . Соотношение сигнал/шум частотного канала вычисляется по формуле  $SNR_k = A_k \sqrt{TF_r}$ .

В случае достаточно точного эфемеридного обеспечения коррелятора пик располагается по центру массива с индексами  $m_{0,k} \approx N/2$  и  $j_{0,k} \approx J/2$ . Координаты откликов всех частотных каналов диапазона должны быть близки друг к другу, координаты откликов по частоте интерференции  $m_{0,k}$  должны быть равными друг другу для всех частотных каналов диапазона, координаты по задержкам  $j_{0,k}$  могут отличаться на единицу.

Отсутствие отклика свидетельствует о сбое или неполной исправности видеоконвертора.

После анализа фаз г.п.и. и корреляционных откликов в отдельных частотных каналах производится вычисление точных значений геометрических задержек.

Для каждого частотного канала диапазона вычисляются средние значения разностей фаз г.п.и.

$$\Delta\varphi_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (\varphi_{k,n,1} - \varphi_{k,n,2}),$$

при этом учитывается переход фазы от  $-180^\circ$  до  $+180^\circ$ . Берется срез двумерного массива спектра по частоте интерференции  $F_{k,m,j}$  для  $m = m_{0,k}$  и выполняется обратное преобразование Фурье



Рис. 6. Коррелятор APK.

$$R_{k,l} = \frac{1}{J} \sum_{j=0}^{J-1} F_{k,m,j} e^{i2\pi lj/J}.$$

Далее информация от всех частотных каналов объединяется, и вычисляется синтезированная кросскорреляционная функция одномерным преобразованием Фурье по всему спектру радиочастот

$$C(\tau) = \frac{1}{JK} \sum_{k=0}^{K-1} e^{-i(2\pi F_k \tau + \Delta\phi_k)} \sum_{l=0}^{J-1} R_{k,l} e^{-i2\pi \frac{F_l}{J} \tau}.$$

Производится перебор значений  $\tau$  в диапазоне

$$[(j_0/F_l) - \Delta; (j_0/F_l) + \Delta],$$

где  $j_0$  – среднее значение координаты корреляционного отклика в отдельных частотных каналах,  $\Delta$  – характерная величина, зависящая от режима наблюдения и обработки и для стандартных астрометрических наблюдений равная 300 нс. Выбирается значение  $\tau$ , при котором амплитуда синтезированной кросскорреляционной функции  $C(\tau)$  максимальна.

Полученные значения являются поправками к эфемеридным значениям задержки и частоты интерференции на соответствующий момент времени. Полные значения задержки и частоты интерференции получаются суммированием вычисленных коррелятором значений с эфемеридными.

Значения задержки и частоты интерференции диапазона 3.5 см используются как выходные, диапазона 13 см – для вычисления ионосферной задержки.

Ионосферная задержка вычисляется по формуле

$$\tau_I = \frac{\tau_X - \tau_S}{R - 1},$$

где  $\tau_X$  и  $\tau_S$  – задержки в диапазонах  $X$  и  $S$ ,  $R = (F_X/F_S)^2$ ,  $F_X$  и  $F_S$  – средние несущих частот диапазонов 3.5 и 13 см соответственно.

#### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРРЕЛЯТОРА

Количество одновременно обрабатываемых сигналов станций – 6, баз – 15, частотных каналов – 240.

Поток данных от каждой станции – до 1 Гбит/с. Суммарный входной поток данных 6-станционного коррелятора – до 6 Гбит/с, суммарный поток на входах базовых модулей – до 30 Гбит/с.

Структура потока данных от каждой станции – до 16 частотных каналов с однобитовым или двухбитовым квантованием (всего 32 разряда), по отдельному разряду передается признак качества. Максимальная тактовая частота – 32 МГц.

Формат входного потока данных коррелятора — VSI-H.

Тип коррелятора — аппаратно-программный XF-коррелятор. Аппаратно вычисляются кросс-корреляционные комплексные функции сигналов — 64 точки каждого частотного канала каждой базы — и выделяются сигналы генераторов пикосекундных импульсов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КОРРЕЛЯТОРА

В конце 2008 г. собрана и установлена в центре корреляционной обработки ИПА РАН первая версия коррелятора, укомплектованная для одновременной обработки сигналов двух станций (одной базы).

В октябре 2009 г. комплектация 6-станционного коррелятора АРК завершена. Фотография коррелятора приведена на рис. 6.

Начиная с февраля 2009 г. во всех наблюдениях р.с.д.б.-комплекса “Квазар-КВО” стали использоваться регистраторы Mark5B, а для обработки — однобазовая версия коррелятора [10, 11].

Наблюдения проводятся раз в две недели по двум программам наблюдений.

Программа наблюдений Ru—E предназначена для определения пяти параметров вращения Земли. Наблюдения проводятся суточными сериями на трех станциях. Поток данных от каждой станции составляет 512 Мбит/с, за сутки на каждой станции заполняется один дисковый модуль Mark5B (2 Тбайта). Регистрация р.с.д.б.-сигналов проводится для 14 частотных каналов с шириной полосы пропускания 16 МГц и однобитовым квантованием.

Программа наблюдений Ru—U предназначена для определения всемирного времени (UT1-UTC) в квазиреальном времени — с передачей данных по волоконно-оптическим линиям связи. Наблюдения в первом полугодии 2009 г. проводились двухчасовыми сериями; в дальнейшем выполняются одночасовыми сериями. Участвуют три станции, при этом одна из станций используется как резервная (минимальное количество станций для этого типа наблюдений — две). Поток данных от каждой станции составляет 256 Мбит/с, за час наблюдений записывается около 40 Гбайт. Регистрация р.с.д.б.-сигналов проводится для 14 частотных каналов с шириной полосы пропускания 8 МГц и однобитовым квантованием. Р.с.д.б.-данные части серий передавались на дисковых модулях Mark5B. С марта 2010 г. наблюдения проводились в режиме e-VLBI с передачей данных по волоконно-оптическим линиям связи [12, 13].

Наблюдались источники с яркостью не менее 0.5 Ян (в обоих диапазонах). Длительность сканов составляла одну минуту.

Все проведенные наблюдения обработаны однобазовой версией коррелятора. Время обработ-

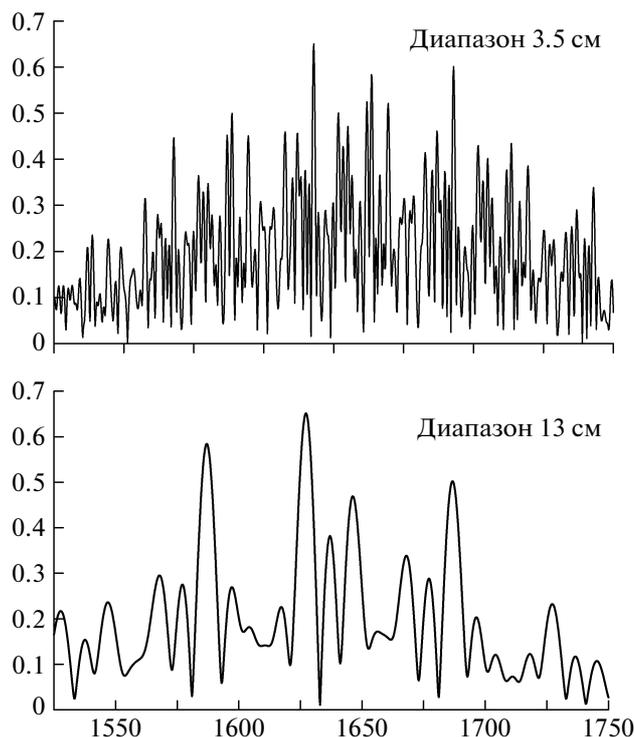


Рис. 7. Амплитуда синтезированных частотных каналов. Серия наблюдений Ru-U104, 22 июня 2010 г., база Бадары—Зеленчукская, скан 20 : 00 : 00, источник 0833 + 585. По оси абсцисс — задержка (нс) относительно предвычисленной, по оси ординат — амплитуда, умноженная на тысячу.

ки для суточной трехбазовой серии Ru—E составляла не более 3 сут. Точность вычисления коррелятором групповых задержек оказалась не хуже 100 пс.

На рис. 7 приведен пример синтезирования частотных каналов для диапазонов 3.5 и 13 см для серии программы наблюдений Ru—U.

В ходе вторичной обработки в центре обработки и анализа ИПА РАН были получены оценки параметров вращения Земли.

В процессе эксплуатации 2009—2010 гг. 6-станционный коррелятор АРК показал высокую надежность и точность вычисления групповых задержек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкельштейн А.М. // Вестник РАН. 2007. Т. 77. С. 608.
2. Финкельштейн А., Ипатов А., Смоленцев С. // Proc. Intern. V IVS General Meeting (IVS GM-2008). Measuring the future / Ed. A. Finkelstein, D. Behrend. SPb.: Nauka, 2008. P. 39.
3. Богданов А.А., Зимовский В.Ф., Мельников А.Е. и др. // Труды ИПА СПб. 2007. № 16. С. 8.

4. *Surkis I., Bogdanov A., Melnikov A. et al.* // Proc. Intern. VIVS General Meeting (IVS GM-2008). Measuring the future / Ed. A. Finkelstein, D. Behrend. SPb.: Nauka, 2008. P. 124.
5. *Whitney A.R.* // Proc. Intern. VLBI Service for Geodesy and Astrometry General Meeting (IVS GM-2004). Ottawa, Canada, Febr. 9–11, 2004. P. 177; <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>
6. *Зимовский В.Ф., Суркис И.Ф.* // Труды ИПА РАН. 2007. Т. 16. С. 211.
7. *Томпсон А.Р., Моран Дж.М., Свенсон Дж.У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Физматлит, 2003. С. 257–270.
8. *Whitney A.R.* // Proc. Intern. VLBI Service for Geodesy and Astrometry General Meeting (IVS GM-2000). Koetzing, Germany; Hanover, Febr. 21–24, 2000. MD: NASA, P. 187; <http://ivscc.gsfc.nasa.gov>
9. *Суркис И.Ф., Шантырь В.А.* // Труды ИПА РАН. 2007. Вып. 16. С. 252.
10. *Финкельштейн А.М., Скурихина Е.А., Суркис И.Ф. и др.* // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34. № 1. С. 66.
11. *Финкельштейн А.М., Гаязов И.С., Скурихина Е.А. и др.* // Труды ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 119.
12. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Кайдановский М.Н. и др.* // II Всерос. научно-техн. конф. “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий”. 2–4 июня 2009. М., 2009. С. 34.
13. *Сальников А.И., Финкельштейн А.М., Ипатов А.В. и др.* // Proc. VIII Intern. e-VLBI Workshop. 2009. PoS(EXPReS09)098.