

## **Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» как основа координатно-временного обеспечения и фундаментальной поддержки системы ГЛОНАСС**

*В статье приведены основные данные о современном состоянии исследований методами РСДБ для астрометрии и прикладной астрономии. Приведены примеры реализации основных устройств, определяющих чувствительность радиотелескопа, для указанных целей.*

**Ключевые слова:** Радиоинтерферометр, РСДБ-технологии, РСДБ-комплекс, РСДБ-коррелятор, радиотелескоп

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), предложенный российскими учеными в 1965 г., через два года был реализован в США и Канаде, после чего началось быстрое развитие РСДБ-технологий и все более широкое их использование как в фундаментальных научных исследованиях, так и в решении конкретных научно-технических задач в различных отраслях хозяйства. В настоящее время активно проводятся РСДБ-наблюдения по международным и национальным программам. В глобальную РСДБ-сеть IVS, например, входят более 40 радиотелескопов, расположенных на всех континентах и на некоторых островах мирового океана, а в европейскую сеть EVN — более 20 радиотелескопов. Отдельные радиотелескопы в России длительное время могли лишь участвовать в РСДБ-исследованиях совместно с зарубежными радиотелескопами, но ситуация кардинально изменилась в лучшую сторону после завершения строительства трех 32-метровых радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» (2008 г.) и ввода в эксплуатацию центра корреляционной обработки данных (ЦКО РАН) в Санкт-Петербурге (2010 г.).

Комплекс «Квазар-КВО» представляет Россию в международном РСДБ-сообществе и активно участвует практически во всех РСДБ-наблюдениях, проводимых по международным программам IVS и EVN и по российским программам, а также участвует в некоторых исследованиях, проводимых в регионе Азии и Австралии. Работа РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» в кооперации с международной РСДБ сетью IVS, обеспечивает Россию данными о Всемирном времени, о параметрах вращения Земли (ПВЗ) — координатах полюсов, прецессии и нутации, а также о наземной и небесной системах отсчета координат [1], [2].

На основе широкой международной кооперации была создана, поддерживается и распространяется международная земная система координат (ITRF/ITRS) [3]. Эта система создавалась с использованием четырех основных технологий космической геодезии — глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, РСДБ, спутниковой лазерной локации и доплеровской системы DORIS. Такие же технологии использовались и при создании национальных геодезических систем координат — ПЗ-90.02 в России и WGS-84 в США.

Для выполнения фундаментальных научных исследований и решения важнейших прикладных задач, поставленных хозяйственными и оборонными отраслями страны, большое значение имеет оперативная информация о Всемирном времени и ПВЗ. Такую информацию дают с разной точностью и оперативностью и спутниковые навигационные системы, и лазерная локация, но только РСДБ позволяет измерить все ПВЗ и Всемирное время и непосредственно установить связь земной и небесной систем координат. Причем РСДБ дает наиболее устойчивые результаты измерений и лучше других методов подходит для поддержания долговременной стабильности рядов ПВЗ. Потому РСДБ-технологии стали основой координатно-временного и эфемеридного обеспечения навигационной системы ГЛОНАСС [3], [4]. Повышение точности и оперативности получения от средств фундаментальной поддержки данных о текущих значениях Всемирного времени и ПВЗ является необходимым условием повышения точности глобальной навигационной системы ГЛОНАСС до уровня, достигнутого американской системой GPS.

Комплекс «Квazar-КВО», работая в автономном режиме, в настоящее время измеряет Всемирное время со среднеквадратической погрешностью 70 мкс один раз в сутки, а координаты полюса — с погрешностью 3 см один раз в неделю. Для повышения точности данных о ПВЗ и Всемирном времени, получаемых комплексом средств фундаментального обеспечения (КСФО) системы ГЛОНАСС, во всех обсерваториях комплекса «Квazar-КВО» установлены спутниковые лазерные дальномеры типа «Сажень-ТМ» и беззапросные измерительные станции (БИС), а в обсерватории «Бадары» — еще и станция космической системы DORIS. Разработанные методики совместной обработки (колокации) данных, полученных от РСДБ-комплекса и от указанных систем, позволили уменьшить систематические ошибки и еще больше повысить точность определения Всемирного времени. Такие точности и быстродействие приемлемы для системы ГЛОНАСС на данном этапе ее развития, но для дальнейшего повышения точности этой системы необходимы более точные и оперативные данные от КСФО. В течение ближайших трех лет необходимо реализовать мониторинг Всемирного времени с периодом обновления данных 6–8 часов с уменьшенной до 10 мкс погрешностью измерений. При этом подразумевается автономная работа РСДБ-комплекса, без привлечения зарубежных радиотелескопов. Координаты полюса должны определяться ежесуточно с погрешностью не более 1 см. На первом этапе такую точность определения ПВЗ предполагается достичь в рамках международной кооперации, но в дальнейшем по мере развития российской РСДБ-сети на малых антеннах эта задача будет решаться автономно.

Оперативный мониторинг ПВЗ и Всемирного времени требует проведения суточных сеансов наблюдений не реже 1 раза в неделю и часовых сеансов 3–4 раза ежедневно. Радиотелескопы с большими антеннами длительное время работать в таком режиме не могут, так как почти не остается времени для текущего регламентного обслуживания радиотелескопов и практически исключается возможность даже небольшого технического обслуживания, ремонта или модернизации оборудования. Использование уникального РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» для оперативного мониторинга Всемирного времени и ПВЗ привело бы к резкому сокращению РСДБ-

исследований в интересах фундаментальных наук – астрометрии, астрофизики, эфемеридной астрономии и др. Поэтому первостепенной задачей стало создание специализированного радиointерферометра с антеннами небольшого (12–13 м) диаметра.

Основной проблемой разработки радиointерферометров нового поколения является сохранение и даже некоторое повышение чувствительности интерферометра при переходе к небольшим антеннам.

Это может быть достигнуто за счет улучшения качества антенн, снижения шумовой температуры  $T_{ш}$  приемной системы, значительного расширения полос пропускания  $\Delta f$  каналов системы преобразования сигналов (СПС) и уменьшения аппаратных потерь когерентности принимаемых сигналов. Профиль 13-метровой антенны, работающей в диапазоне частот 2–40 ГГц, должен выдерживаться с точностью 0.3 мм, а коэффициент использования поверхности должен быть не ниже 0.7–0.8.

Чтобы уменьшить  $T_{ш}$ , разрабатывают модули облучателей, в которых до водородного уровня (20 °К) охлаждаются не только малошумящие широкополосные усилители (МШУ), но и элементы облучателя, входные преобразователи волн и поляризаторы. Не менее эффективно и расширение полос пропускания каналов СПС, поскольку чувствительность радиointерферометра увеличивается пропорционально корню квадратному из полосы регистрации. В современных СПС шумовые сигналы оцифровываются для регистрации на видеочастотах ( $\Delta f \leq 16$  МГц), а в новых системах это должно выполняться в каналах промежуточных частот с полосами  $\Delta f = 0.5$  ГГц или 1 ГГц [5], [6]. Улучшение амплитудночастотных и фазочастотных характеристик каналов и спектральных характеристик гетеродинов также дает заметный вклад в повышение чувствительности

Для повышения точности угловых измерений увеличивают быстродействие систем наведения антенн, что позволяет почти вдвое увеличить число наблюдаемых в течение сеанса источников излучения. Скорость вращения антенн по азимуту должна быть не менее 12 град./с, при ускорениях до 5 град./с, а по углу места — 6 град./с и 3 град./с соответственно. Пределы поворота по азимуту  $\pm 270^\circ$  и по углу места 5–88°. Погрешности наведения и сопровождения не должны превышать 45 и 15 угловых секунд соответственно.

Другой резерв повышения точности измерений — увеличение числа приемных каналов и расширение общей полосы частот  $B_f$ , в которой принимаются сигналы. Большое значение имеют также совершенствование методов и аппаратуры фазовой и амплитудной калибровки каналов и систем измерения задержек сигналов, точность совмещения шкал времени радиотелескопов и повышение стабильности опорных частот и единиц времени (секунд), используемых на радиотелескопах. Современные стандарты частоты имеют суточную нестабильность частоты  $(1-3) \cdot 10^{-15}$ , но уже разрабатываются стандарты с нестабильностью  $5 \cdot 10^{-16}$ . Для оснащения радиотелескопов разрабатывается радиометр водяного пара, который позволит точнее учитывать влияние влажности атмосферы.

Информационный поток данных, получаемых с каждого радиотелескопа РСДБ-сети, увеличивается с 0.5–1 Гбит/с до 8–16 Гбит/с. Это требует разработки соответствующих устройств буферизации данных и программных РСДБ-корреляторов, увеличения скорости передачи данных по линиям радиотелескоп – коррелятор.

ИПА РАН планирует разработать и изготовить в 2014 г. опытные образцы радиотелескопов с 13-метровыми антеннами и в 2015 г. ввести в действие радиоинтерферометр с базой 4405 км (Зеленчукская – Бадары) для оперативного измерения Всемирного времени. В те же сроки будет разработан программный коррелятор для радиоинтерферометра. В последующие 2–3 года планируется установить радиотелескопы с малыми антеннами около Калининграда и Уссурийска, что существенно повысит точность измерений Всемирного времени за счет увеличения базы до 6900 км. Более широкие исследования, включая измерения ПВЗ, будут проводиться в кооперации с зарубежными радиотелескопами, а после развития отечественной РСДБ-сети на малых антеннах — автономно. За рубежом такую сеть планируют создать в 2017 г. [7].

В настоящее время в ИПА РАН разрабатываются основные компоненты радиотелескопа: охлаждаемый блок многодиапазонного облучателя со встроенными МШУ для 13-метровой антенны, микроэлектронные блоки усиления и преобразования частот сигналов, цифровая СПС с широкополосными (0.5 ГГц) каналами, средства буферизации и передачи данных, системы управления и контроля. Для двухэлементного радиоинтерферометра на малых антеннах проектируется программный РСДБ-коррелятор типа FX на базе blade-серверов IBM NX5 с 8-ядерными 16-разрядными процессорами Intel Xeon 7500, работающими с тактовой частотой 2.2 ГГц.

На рис. 1 показан макет охлаждаемого облучателя с МШУ на диапазоны волн (8.5–9.1 ГГц) и (2.15–2.4 ГГц), у которых  $T_{ш} = 14$  К и 11 К соответственно.

Кольцевая антенна соединена со ступенью охладителя, имеющей температуру 20 К, а азотный экран криостата — со ступенью, имеющей температуру 80 К. Первые каскады усилителей охлаждающиеся до температуры 20 К имеют коэффициент усиления 30 дБ. Суммарная шумовая температура системы должна составлять 20 – 25 К.

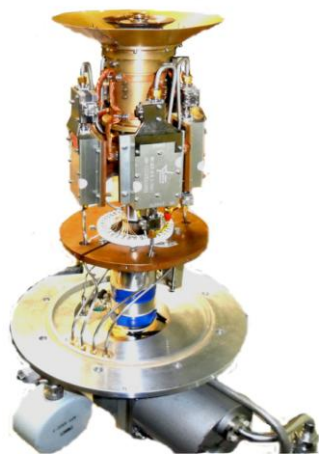


Рис. 1. Внешний вид сборки микроохладителя, облучателя и МШУ

Расчетные значения шумовой температуры на входе восьмиканального фокального блока по диапазонам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетная шумовая температура на входе фокального блока

Диапазон	Вклад в шумовую температуру, К									Итого T <sub>ш</sub> , К
	Укрытие*	Облучатель*	Кабель облуч.**	Вентиль	КриоМШУ	Теплоразв. кабель**	Гермоввод*	Кабель**	БПЧ	
<b>S</b>	3	3	0.11	1.53	3.47	0	0	0.01	0.06	<b>11</b>
<b>C</b>	3	3	0.37	0.76	4.49	0.01	0	0.02	0.26	<b>12</b>
<b>X</b>	3	3	0.85	0.78	5.78	0	0.01	0.04	0.06	<b>14</b>
<b>Ku</b>	3	3	1.04	0.79	7.02	0.02	0.01	0.04	0.88	<b>16</b>

На рис. 2 показан макет цифровой СПС, состоящей из комплекта СВЧ конверторов на заданные диапазоны волн и 4-канального модуля цифрового преобразования сигналов (МЦПС). Каждый СВЧ конвертор, собранный из двух или трех интегрально-гибридных микросборок, переносит спектр сигнала из принимаемого участка диапазона 2.2–14 ГГц в диапазон ПЧ 1–1.5 ГГц, в котором работают каналы цифрового преобразования сигналов (КЦПС) с полосами  $\Delta f = 512$  МГц, сформированные на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). С каждого канала снимается поток данных с информационной скоростью 2 Гбит/с в формате VDIF, рекомендуемом для новых РСДБ-комплексов. Эти потоки по волоконно-оптическим линиям передачи (ВОЛП) поступают в систему буферизации и передаются далее в РСДБ-коррелятор.

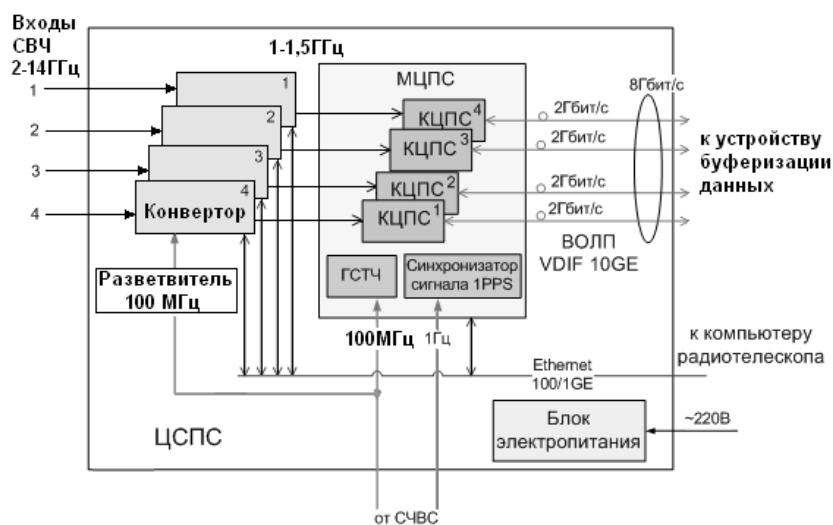


Рис. 2. Цифровая система преобразования сигналов

Во всех этих разработках важнейшую роль играют молодые специалисты, в том числе выпускники СПбГЭТУ. Значительный вклад в повышение профессионального уровня молодых специалистов и в подготовку научных кадров вносит базовая кафедра «Радиоастрономия». Новые задачи, поставленные жизнью перед ИПА РАН, требуют более широкого привлечения к разработкам и научным исследованиям молодых специалистов и более тесного сотрудничества с кафедрами вузов.

## Библиографический список

1. Финкельштейн А. М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение // Вестник РАН. – М.: Наука, 2007. Т. 77. № 7. С. 608–617.
2. Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Скурихина Е. А. и др. Фундаментальное координатно-временное обеспечение системы ГЛОНАСС средствами РСДБ-сети «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН – СПб.; Наука, 2007. № 17. С. 3–23.
3. Лаверов Н. П., Крутиков В. Н., Финкельштейн А. М. Фундаментальный сегмент координатно-временного и навигационного обеспечения // Труды ИПА РАН – СПб.; Наука, 2009. № 20. С. 41–55.
4. Лаверов Н. П., Шилов А. Е., Крутиков В. Н., и др. Взгляд на координатно-временное и навигационное обеспечение России // Труды ИПА РАН – СПб.; Наука, 2009. № 20. С. 11–19.
5. Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. РСДБ-терминалы комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН – СПб.; Наука, 2007. № 16. С. 298–302.
6. Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Гренков С. А., Носов Е. В. Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов // Приборы и техника эксперимента, 2010. № 5. С. 60–66.
7. Hase H., Behrend D., Ma C. et. al. The Future Global VLBI2010 Network of the IVS // Proc/ of the 20<sup>th</sup> Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. March 29-30, 2011. Bonn. ISSN 1864-1113. P. 78–81.