

61. Bertaux J-L *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S01 (2006)
62. Chang I C *Appl. Phys. Lett.* **25** 370 (1974)
63. Korablev O et al. *Adv. Space Res.* **29** 143 (2002)
64. Korablev O et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S03 (2006)
65. Formisano V et al. *Planet. Space Sci.* **53** 963 (2005)
66. Bertaux J-L et al. *Nature* **435** 790 (2005)
67. Bertaux J-L et al. *Science* **307** 566 (2005)
68. Bertaux J L et al. *J. Geophys. Res. Planets* **117** E00J04 (2012)
69. Fedorova A A et al. *Icarus* **219** 596 (2012)
70. Fedorova A et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S07 (2006)
71. Perrier S et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S06 (2006)
72. Lebonnois S et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S05 (2006)
73. Lefèvre F et al. *Nature* **454** 971 (2008)
74. Head J W et al. *Nature* **434** 346 (2005)
75. Levrard B et al. *Nature* **431** 1072 (2004)
76. Fedorova A et al. *J. Geophys. Res. Planets* **111** E09S08 (2006)
77. Trokhimovskiy A et al., in *39th COSPAR Scientific Assembly, 14–22 July 2012, Mysore, India*, Abstract D2.1-19-12, p. 2005
78. Fedorova A A et al. *Icarus* **200** 96 (2009)
79. Maltagliati L et al. *Science* **333** 1868 (2011)
80. Maltagliati L et al. *Icarus* **223** 942 (2013)
81. Maltagliati L et al. *Icarus* **213** 480 (2011)
82. Fouchet T et al. *Icarus* **190** 32 (2007)
83. Tschimmel M et al. *Icarus* **195** 557 (2008)
84. Korablev O et al., in *Second Workshop on Mars Atmosphere Modelling and Observations, February 27–March 3, 2006, Granada, Spain* (Eds F Forget et al.) (Paris, 2006) p. 244
85. Korablev O, in *37th COSPAR Scientific Assembly, 13–20 July 2008, Montréal, Canada*, p. 1580
86. Fedorova A A et al. *Icarus* **208** 156 (2010)
87. Smith M D *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **36** 191 (2008)
88. Засова Л В и др. *Космич. исслед.* **44** 319 (2006) [Zasova L V et al. *Cosmic Res.* **44** 305 (2006)]
89. Wolkenberg P et al. *Icarus* **215** 628 (2011)
90. Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C *Icarus* **172** 537 (2004)
91. Mumma M J et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **36** 1127 (2004)
92. Mumma M J et al. *Science* **323** 1041 (2009)
93. Geminale A, Formisano V, Giuranna M *Planet. Space Sci.* **56** 1194 (2008)
94. Geminale A, Formisano V, Sindoni G *Planet. Space Sci.* **59** 137 (2011)
95. Krasnopolsky V A *Icarus* **217** 144 (2012)
96. Villanueva G L et al. *Icarus* **223** 11 (2013)
97. Zahnle K, Freedman R S, Catling D C *Icarus* **212** 493 (2011)
98. Lefèvre F, Forget F *Nature* **460** 720 (2009)
99. Webster C R et al. *LPI Contrib.* (1719) 1366 (2013)
100. Zurek R W et al. *Planet. Space Sci.* **59** 284 (2011)
101. Abrams M C et al. *Appl. Opt.* **35** 2774 (1996)
102. von Clarmann T et al. *J. Geophys. Res. Atmos.* **108** 4736 (2003)
103. Bernath P F et al. *Geophys. Res. Lett.* **32** L15S01 (2005)
104. Kasuya M, Nakajima M, Hamazaki T *Trans. Space Technol. Jpn.* **7** (ists26) To\_4\_5 (2009)
105. Korablev O I, Bertaux J-L, Vinogradov I I *Proc. SPIE* **4818** 272 (2002)
106. Korablev O I et al., in *Proc. of the 5th Intern. Conf. on Space Optics, ICSSO 2004, 30 March–2 April 2004, Toulouse, France* (ESA SP-554, Ed. B Warmbein) (Noordwijk: ESA Publ. Division, 2004) p. 73
107. Nevejans D et al. *Appl. Opt.* **45** 5191 (2006)
108. Кораблев О И и др. *Оптич. журн.* **78** (5) 44 (2011) [Korablev O I et al. *J. Opt. Technol.* **78** 317 (2011)]
109. Korablev O et al. *Appl. Opt.* **52** 1054 (2013)
110. Кораблев О И и др. *Астрон. вестн.* **46** 34 (2012) [Korablev O I et al. *Solar Syst. Res.* **46** 31 (2012)]
111. Drummond R et al. *Planet. Space Sci.* **59** 292 (2011)
112. Korablev O et al., in *39th COSPAR Scientific Assembly, 14–22 July 2012, Mysore, India*, Abstract E2.6-22-12, p. 969
113. Кораблев О И *УФН* **175** 655 (2005) [Korablev O I *Phys. Usp.* **48** 626 (2005)]

PACS numbers: **07.57**, – c, **84.40**, – x, **89.20**, – a  
DOI: 10.3367/UFNr.0183.201307i.0769

## Радиоинтерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований

А.В. Ипатов

### 1. Введение

Институт прикладной астрономии РАН разработал проект четырёхэлементного радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) для проведения фундаментальных и прикладных исследований. РСДБ-наблюдения, выполненные на этом интерферометре, позволяют определять параметры вращения Земли (ПВЗ) и координаты станций на миллиметровом уровне точности, а также оперативно определять всемирное время в интересах Глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС).

Основные научные задачи фундаментального координатно-временного и навигационного обеспечения, для решения которых предназначены радиоинтерферометры, следующие:

- построение и поддержание небесной опорной системы координат в виде каталогов координат внегалактических радиисточников;

- построение и поддержание земной опорной системы координат в виде каталогов координат и скоростей опорных станций;

- определение параметров взаимной ориентации земной и небесной опорных систем координат — параметров вращения Земли;

- построение динамических систем координат в виде эфемерид тел Солнечной системы и космических аппаратов;

- уточнение национальной шкалы координированного времени UTC (SU) и поддержание её в заданных пределах по отношению к шкале всемирного координированного времени UTC;

- построение моделей распространения сигналов в атмосфере и ионосфере.

Следует отметить, что в настоящее время требования к точности и оперативности координатно-временного и навигационного обеспечения прикладных задач часто сравнимы с требованиями фундаментального координатно-временного обеспечения. Так, например, навигационные определения по сигналам ГЛОНАСС должны выполняться с итоговой погрешностью не более 30 см. При этом погрешность за счёт фундаментального сегмента не должна превышать 3 см. Для достижения такой точности навигационных определений комплекс средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли должен обеспечивать точность определения 0,1 мс дуги для координат полюса, углов нутации и прецессии и 10 мкс для всемирного времени [1]. Причём частота получения данных должна быть не реже 3–4 раз в сутки. Наиболее отчётливо это подтверждается целевыми инди-

А.В. Ипатов. Институт прикладной астрономии РАН,  
Санкт-Петербург, РФ  
E-mail: ipatov@ipa.nw.ru

**Таблица 1.** Целевые индикаторы и показатели Федеральной целевой программы "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы"

Пункт	Целевые индикаторы и показатели	2011 г.	2015 г.	2020 г.
2.6	Погрешность определения параметров вращения Земли			
2.6.1	Координаты полюса в оперативном режиме, м	0,06	0,06	0,006
2.6.2	Координаты полюса в апостериорном режиме, м	0,03	0,03	0,002
2.6.3	Всемирное время в оперативном режиме отечественными средствами, мс	0,07	0,07	0,02
2.6.4	Всемирное время в апостериорном режиме, мс	0,03	0,03	0,01
2.6.5	Параметры прецессии и нутации, м	0,01	0,01	0,003
2.8	Погрешность ГГСК *			
2.8.1	Параметры связи ГГСК и ITRF **, м	0,5	0,06	0,01
2.8.2	ГГСК, реализуемая ГЛОНАСС, м	0,2	0,1	0,02
2.8.3	Относительная привязка пунктов ФАГС ***, м	0,05	0,01	0,005

\* ГГСК — Государственная геоцентрическая система координат.

\*\* ITRF — International Terrestrial Reference Frame.

\*\*\* ФАГС — Фундаментальная астрономо-геодезическая сеть.

каторами Федеральной целевой программы "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы" [2], приведёнными в табл. 1.

В настоящее время в России подобные задачи решаются комплексом "Квазар-КВО" (КВО — аббревиатура от "координатно-временное обеспечение") при работе в составе радиоинтерферометрической сети Международной РСДБ-службы для геодезии и астрометрии (International VLBI (Very Long Baseline Interferometry) Service for Geodesy and Astrometry — IVS)). От комплекса "Квазар-КВО" в состав IVS входят три обсерватории, коррелятор, центры обработки и анализа и центр разработки РСДБ-аппаратуры.

По наблюдениям РСДБ-комплекса "Квазар-КВО" выполняется еженедельное определение координат полюса и углов прецессии и нутации с погрешностью менее чем 0,001 с дуги. Оперативное определение всемирного времени выполняется ежедневно в пределах 6-часового интервала с погрешностью менее 70 мкс [3].

Работая в составе международной службы РСДБ, "Квазар-КВО" обеспечивает получение Россией данных о Международной земной системе координат (International Terrestrial Reference Frame — ITRF) и Международной небесной системе координат (International Celestial Reference Frame — ICRF) и данных о параметрах вращения Земли. Точность определений в этом случае следующая:

- небесная система координат — 100 мкс дуги для радиоисточников ICRF;
- земная система координат — 5 мм для станций ITRF;
- параметры вращения Земли [4] — 100 мкс дуги для координат полюса, углов нутации и прецессии, 10 мкс для всемирного времени;
- параметры тропосферы — 5 мм.

Радиоастрономические обсерватории комплекса "Квазар-КВО": в посёлке Светлое Ленинградской области, станции Зеленчукская Карачаево-Черкесии и урочище Бадары Бурятии — входят в состав 15 основных опорных станций проекта Глобальной геодезической

наблюдательной системы (Global Geodetic Observing System — GGOS). Основные опорные станции определяются как станции, на которых совместно расположены инструменты космической геодезии нового поколения (включая РСДБ, средства лазерной локации спутников (Satellite Laser Ranging — SLR), приёмники глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и, по возможности, антенну системы DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite)), при этом параметры связи опорных точек наблюдательных средств станций имеют такую же или более высокую точность, как и точность системы отсчёта.

Международное сообщество GGOS разработало рекомендации по поддержанию и развитию аппаратно-программных средств опорных станций глобальной геодезической инфраструктуры [5]. Опорные станции со своей инфраструктурой должны предоставлять количественную информацию для определения и мониторинга координат опорных источников небесной системы координат и координат опорных станций земной системы координат, а также информацию о параметрах вращения Земли, уровне моря, круговороте воды, климате и об угрозе стихийных бедствий.

Международная служба РСДБ в свою очередь разработала проект развития радиоинтерферометрии РСДБ-2010 [6], направленный на кардинальное повышение точности фундаментальных систем координат и параметров вращения Земли с получением результатов на миллиметровом уровне точности (табл. 2). В этом проекте сформулированы требования, которым должны удовлетворять перспективные станции IVS. Радиотелескопы нового поколения должны иметь технические характеристики, приведённые в табл. 3.

Как можно заметить, целевые индикаторы системы ГЛОНАСС близки к требованиям, предъявляемым фундаментальной наукой, и полностью соответствуют тенденциям развития радиоинтерферометрии, разработанным международной РСДБ-службой. Новый отечественный интерферометр целесообразно создавать, принимая во внимание следующие принципы:

**Таблица 2.** Результаты проекта РСДБ-2010 и их ожидаемая точность

Результаты	Параметр	Значение
Координаты полюса ( $x_p, y_p$ )	Точность Скорость получения Временное разрешение Частота наблюдений	25 мкс дуги 1 сут 10 мин – 1 ч Ежедневно, круглосуточно
Всемирное время (UT1 – UTC)	Точность Скорость получения Временное разрешение Частота наблюдений	2 мкс 1 сут 10 мин Ежедневно, круглосуточно
Углы нутации	Точность Скорость получения Временное разрешение Частота наблюдений	25 мкс дуги 1 сут 1 сут 1 раз в неделю
Небесная система координат	Точность Частота наблюдений	0,15 мс дуги 1 месяц
Земная система координат	Точность	2 мм

— радиотелескопы нового радиоинтерферометра должны быть полностью совместимыми с радиотелескопами сети "Квазар-КВО";

— проект должен основываться на результатах рабочей группы РСДБ-2010;

— должны учитываться условия радиоклимата в местах расположения радиотелескопов;

— радиотелескопы должны работать 24 часа в сутки, 7 дней в неделю;

— радиотелескопы должны быть максимально разнесены по долготе.

Частотный диапазон работы радиоинтерферометра выбран с учётом рабочих частот комплекса "Квазар-КВО" и перспективы перехода в более высокочастотный диапазон для расширения полосы регистрируемых сигналов и работы по международным программам с радиотелескопами Германии и Испании.

Реализация проекта будет проходить в три этапа. На первом этапе мы будем регистрировать одну полосу в диапазоне 2,2 ГГц (S-полоса) шириной около 300 МГц для определения ионосферной задержки и три полосы по 512 МГц, расположенные рядом, в диапазоне частот 8,0–9,5 ГГц (X-полоса), для определения групповой задержки. При двухбитовом квантовании, четырёх каналах регистрации и двух поляризациях поток данных с каждого радиотелескопа составит 16 Гбит с<sup>-1</sup>. Точность определения групповой задержки составит около 4 пс.

На втором этапе проекта мы планируем регистрировать одну полосу шириной 500 МГц в диапазоне 7–9 ГГц (X-полоса) — для определения ионосферной задержки — и три полосы шириной 500 МГц в диапазоне 28–34 ГГц (Ka-полоса) с синтезированной полосой 6 ГГц — для определения групповой задержки. Точность определения групповой задержки составит около 2 пс. Два радиотелескопа нового радиоинтерферометра будут расположены в обсерваториях комплекса "Квазар-КВО" "Бада-ры" и "Зеленчукская". Третий и четвёртый радиотелескопы предполагается установить в районах Уссурийска и Калининграда для более точного определения всемирного времени в интересах ГЛОНАСС.

В состав радиоинтерферометра нового поколения входят: антенная система, приёмная система, цифровая широкополосная 8-канальная система преобразования сигналов, система буферизации и передачи данных, система частотно-временной синхронизации, программный коррелятор для обработки данных и система измерения электрических характеристик атмосферы.

## 2. Антенная система радиоинтерферометра

В качестве антенной системы (АС) радиоинтерферометра выбрана АС фирмы "Vertex Antennentechnik GmbH" (Германия) диаметром 13,2 м (рис. 1), рекомендованная IVS, с параметрами, приведёнными в табл. 4.

## 3. Приёмная система радиотелескопа

Приёмники радиотелескопа располагаются в фокальном контейнере. Трёхдиапазонный облучатель [7] и входные усилители, расположенные в криостате, охлаждаются

**Таблица 3.** Технические характеристики радиотелескопов

Параметр	Текущее состояние	РСДБ-2010
Время работы	24 ч, один раз в неделю	Круглосуточно
Время восстановления	До нескольких месяцев	< 24 ч
Диаметр антенны	5–100 м	10–12 м
Скорость движения	≈ 20–200 град мин <sup>-1</sup>	≥ 360 град мин <sup>-1</sup>
Частоты приёма	S/X	~ 2–15(18) ГГц
Скорость записи	128; 256 Мбит с <sup>-1</sup>	8–16 Гбит с <sup>-1</sup>
Передача данных	Транспортировка дисков, в отдельных случаях e-РСДБ *	e-РСДБ, в отдельных случаях транспортировка дисков
Число станций	40 станций, распределённых случайным образом	40 станций, распределённых оптимальным образом
Число станций, оснащённых: тремя средствами измерений четырьмя средствами измерений	16 5	40 20

\* e-РСДБ (e-VLBI) — так называемая электронная РСДБ — РСДБ в реальном времени.



Рис. 1. Антенная система радиотелескопа РТ-13.

микроригенной системой замкнутого цикла охлаждения до температуры жидкого водорода. Электромагнитные волны, сфокусированные антенной, попадают сквозь радиопрозрачное покрытие внутрь криостата, где собираются облучателем, разделяются по диапазонам (S, X, и Ka) и поляризациям, складываются с сигналами фазовой и амплитудной калибровок от блока калибровочных сигналов и усиливаются охлаждаемыми малошумящими транзисторными усилителями (МШУ). При этом вся аппаратура, находящаяся внутри криостата, включая облучатель, охлаждается до температуры 20 К, что значительно снижает собственные шумы системы радиотелескопа – радиометр [8].

Усиленные МШУ сигналы правой и левой круговых поляризаций трёх частотных диапазонов поступают на входы преобразовательных каналов. Каждый преобразовательный канал работает в своём частотном диапазоне и со своей поляризацией. В каналах осуществляется усиление, преобразование частоты в диапазон 1–2 ГГц, формирование выходной полосы промежуточной частоты и фильтрация сигнала. Синхронизация приёмных каналов осуществляется от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа.

Макет широкоапертурного трёхдиапазонного облучателя в криостате представлен на рис. 2, а параметры приёмной системы радиотелескопа приведены в табл. 5.

#### 4. Система частотно-временной синхронизации

Система частотно-временной синхронизации (СЧВС) обеспечивает единство частотно-временных и координатных систем.

Таблица 4. Основные технические характеристики антенной системы

Система радиотелескопа	Зеркальная, с контррефлектором
Размещение приёмников	Вторичный фокус, в контейнере
Диаметр зеркала	12–13 м
Диапазон частот (не менее)	2,0–40,0 ГГц
Точность поверхности, включая контррефлектор (не более)	0,2 мм
Температура антенны $T_a$ , исключая атмосферу (не более)	10 К
Коэффициент использования площади телескопа, в диапазоне частот 3–18 ГГц (не менее)	0,7
Пределы поворота по азимуту	$\pm 270^\circ$
Пределы поворота по углу места	$-5^\circ - 90^\circ$
Скорость вращения по азимуту (не менее), ускорение (не менее)	12 град $\text{с}^{-1}$ 3 град $\text{с}^{-2}$
Скорость вращения по углу места (не менее), ускорение (не менее)	6 град $\text{с}^{-1}$ 3 град $\text{с}^{-2}$
Точность сопровождения (не хуже)	16 угл. секунд
Температура окружающего воздуха	от $-40^\circ\text{C}$ до $+50^\circ\text{C}$
Внешние воздействия	Дождь, снег, иней, роса
Максимальная рабочая скорость ветра Максимальная допустимая скорость ветра	20 $\text{м с}^{-1}$ 55 $\text{м с}^{-1}$
Количество перестановок в течение суток (не менее)	1000
Срок службы антенны с учётом планового обслуживания и ремонта (не менее)	20 лет
Сейсмические воздействия	Ускорение по горизонтали 0,3g, Ускорение по вертикали 0,1g



**Рис. 2.** Трёхдиапазонный облучатель в криостате (без радиопрозрачного окна).

натно-временных измерений РСДБ-комплекса, осуществляет синхронизацию работы радиотелескопа и моментов начала регистрации информации на наблюдательных пунктах, а также контроль фазовых характеристик приёмно-регистрирующей аппаратуры [9].

Для передачи на радиотелескоп сигнала опорной частоты водородного генератора используется оптоволоконная линия с реализацией обратной посылки для обеспечения фазовой стабильности. Общая вносимая нестабильность частоты не превышает  $5 \times 10^{-15}$  при часовом усреднении. Сигналы шкалы времени радиотелескопа (секундные импульсы 1 PPS (Pulse Per Second) и импульсы кода времени IRIG-B (Inter-Range Instrumentation Group—Time Code Format B)) формируются из сигнала опорной частоты с использованием секундных импульсов приёмника глобальной навигационной системы (ГНС). При этом синхронизация наблюдений обсерваторий РСДБ-комплекса и регистрация моментов наблюдений радиоисточников осуществляются по шкале всемирного времени UTC с субмикросекундной точностью.

Для контроля фазовой стабильности приёмно-регистрирующего тракта используется сигнал фазовой калибровки, представляющий собой импульсы пикосекундной длительности. Генератор пикосекундных импульсов (ГПИ) формирует привязанный по фазе к сигналу опорной частоты сигнал фазовой калибровки в виде импульсов с частотой повторения 1 МГц и длительностью менее

20 пс, что обеспечивает непрерывный спектр сигнала фазовой калибровки при частотах вплоть до значений порядка 40 ГГц. Каждая спектральная составляющая калибровочного сигнала вместе с принимаемым сигналом проходят через весь приёмно-усилительный тракт и регистрируются вместе с полезным сигналом.

### 5. Цифровая широкополосная система преобразования сигналов BRAS

Радиотелескопы комплекса "Квазар-КВО" оснащены аналоговой системой преобразования сигналов [10]. Для компенсации потерь чувствительности радиотелескопа вследствие существенного снижения эффективной площади антенны разрабатывается новая цифровая широкополосная система преобразования сигналов (Broadband Russian Acquisition System — BRAS) [11]. Система основана на цифровой обработке сигналов промежуточных частот (ПЧ) с выходов радиоастрономических приёмных устройств и построена по модульному принципу. Она состоит из восьми одинаковых модулей каналов цифрового преобразования (КЦП) сигналов, модуля синхронизации и узла электропитания. Модули соединяются между собой через кроссплату, на которой разветвляются сигналы синхронизации и управления модулями КЦП. Наличие в системе единого модуля синхронизации обеспечивает синхронное формирование цифровых потоков на выходах всех восьми каналов BRAS. В каждом КЦП входные сигналы в полосе частот 1,0–1,5 ГГц, поступающие с выхода соответствующего приёмного устройства радиотелескопа, преобразуются в цифровой информационный поток в формате VDIF (VLBI Data Interchange Format), который затем по оптическому интерфейсу 10 G Ethernet транслируется в устройство буферизации данных радиотелескопа. КЦП содержит входной фильтр, ограничивающий спектр сигнала по ширине полосы частот, аттенуатор для установки уровня сигнала на входе канала, быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа ADC081500, программируемую логическую интегральную микросхему (ПЛИС) типа XC6SLX100T Spartan-6. ПЛИС измеряет среднеквадратическое значение сигнала, производит цифровое 2-битовое квантование и формирование цифрового потока в формате VDIF, а также содержит выходной оптический трансивер.

В модуле синхронизации происходит формирование сигналов тактовых частот 1024 МГц для АЦП и 256 МГц для ПЛИС, а также их привязка по фазе к поступающим от СЧВС сигналам опорной частоты 100 МГц и сигналам шкалы времени 1 Гц. Кроме того, в модуле синхронизации осуществляются формирование меток времени для цифровых потоков в формате VDIF и измерение задержек между этими метками и секундными импульсами шкалы времени радиотелескопа (1 Гц шкалы времени), а

**Таблица 5.** Параметры приёмной системы радиотелескопа РТ-13

Диапазон	Рабочий диапазон частот, ГГц	Поляризация	Оценка шумовой температуры, К	Ширина диаграммы направленности облучателя (–16 дБ)	Число субканалов ПЧ	Режимы работы
S	2,2–2,6	Левая и правая круговые	23,2	130°	2	1S + 3X 1X + 3Ka
X	7,0–9,5		29,7		6	
Ka	28–34		44,5		6	



Таблица 6. Основные параметры BRAS

Параметр BRAS	Значение
Число каналов в системе	8
Полоса пропускания канала	512 МГц
Тактовая частота считывания цифровых выборок сигнала	1024 МГц
Вид квантования	2-бит
Суммарная скорость информационного потока на выходе каждого канала	2048 Мбит с <sup>-1</sup>
Суммарная скорость информационного потока на выходе системы	16 Гбит с <sup>-1</sup>
Формат данных на выходе системы	VDIF
Выходной интерфейс	10 GE
Сигналы синхронизации	100 МГц и 1 Гц
Интерфейс управления	Ethernet

также импульсами от приёмника глобальной навигационной системы (1 Гц ГНС).

Распределённая система управления BRAS реализована на контроллерах в ПЛИС КЦП и в модуле синхронизации. Сигналы управления между модулями передаются через интерфейс UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Интерфейс связи (Ethernet) с центральным компьютером управления радиотелескопом размещён в модуле синхронизации. Максимальная полоса пропускания каналов BRAS составляет до 512 МГц, что соответствует суммарной скорости выходного информационного 2-битового потока 16 Гбит с<sup>-1</sup> (табл. 6).

Модульное исполнение системы со съёмными модулями стандарта Eurorack обеспечивает удобство эксплуатации, а вибростойкий корпус габаритами 440 × 310 × 235 мм с электромагнитным экранированием позволяет разместить BRAS в угломестной кабине радиотелескопа. Узел электропитания типа AC–DC (Alternating Current–Direct Current) фирмы "Delta Elektronika" размещается в том же корпусе вместе с модулями системы.

Экспериментальные исследования изготовленных 2-канальных прототипов BRAS (рис. 3) на радиоинтерферометре "Светлое"–"Зеленчукская" подтвердили правильность технических и программных решений, заложенных в систему. Опытные образцы BRAS будут установлены на радиотелескопах РТ-13 в обсерваториях "Зеленчукская" и "Бадары" комплекса "Квазар-КВО".

## 6. Система буферизации и передачи данных для радиоинтерферометра с малыми антеннами

Для оперативной передачи данных из обсерваторий на коррелятор в обсерваториях и точках доступа в магистральные каналы связи размещается сетевое и серверное оборудование, поддерживающее стандарты 10G Ethernet.

Разработан прототип системы буферизации и передачи данных (СБПД) на базе двух серверов: Dell R720 с двумя внешними массивами Dell PV MD1220, обеспечивающими подключение 24 накопителей (HDD) 2,5" (SAS/

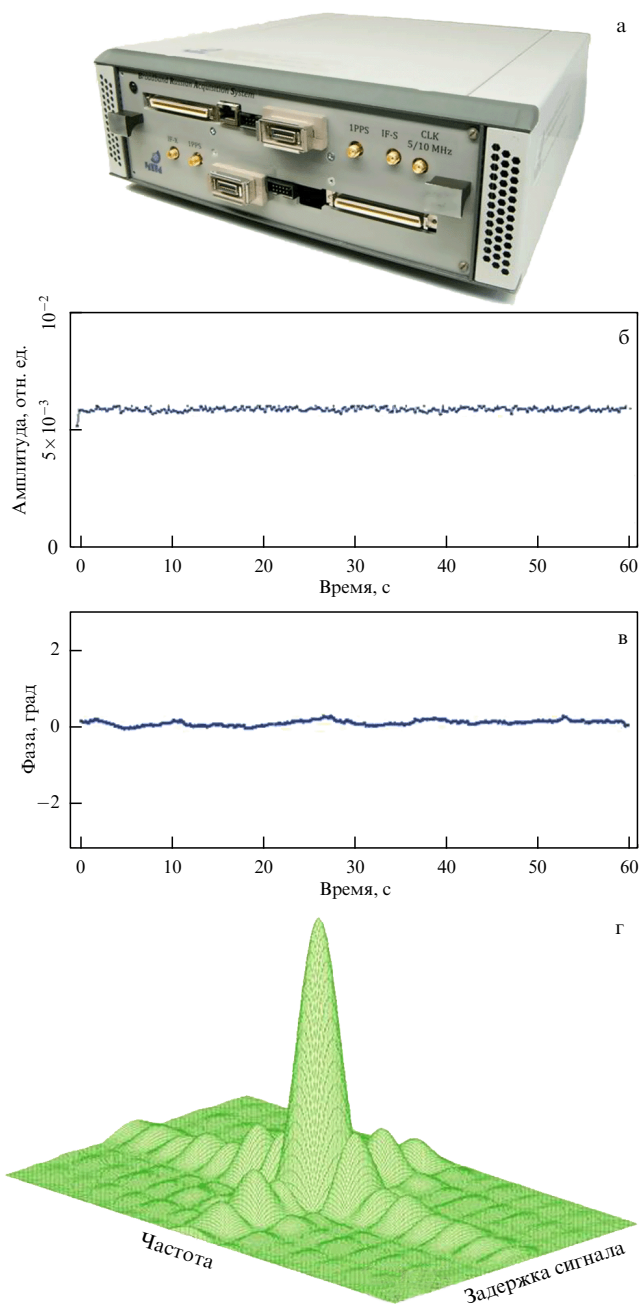


Рис. 3. (а) Макет каналов широкополосной цифровой системы преобразования сигналов. Корреляционный отклик: (б) амплитуда, (в) фаза и (г) пример вида модуля спектра мощности — при наблюдении источника 0059 + 581 на базе "Светлое"–"Зеленчукская" в полосе 512 МГц X-диапазона частот 21 сентября 2012 г. с помощью разработанных макетов.

SSD) в каждом массиве (рис. 4). Массивы соединены с сервером по интерфейсу SAS (Serial Attached SCSI (Small Computer System Interface)). На серверах установлены операционные системы UNIX (Linux версии Ubuntu 12.04 с файловой системой ext4 и FreeBSD-9.1 с файловой системой ZFS (Zetabyte File System)).

На этом прототипе проведено моделирование записи реального потока данных 16 Гбит с<sup>-1</sup> часового сеанса РСДБ-наблюдений (60 сканов радиоисточников). Оценена скорость передачи данных между серверами, соединёнными по волоконно-оптической линии связи с про-

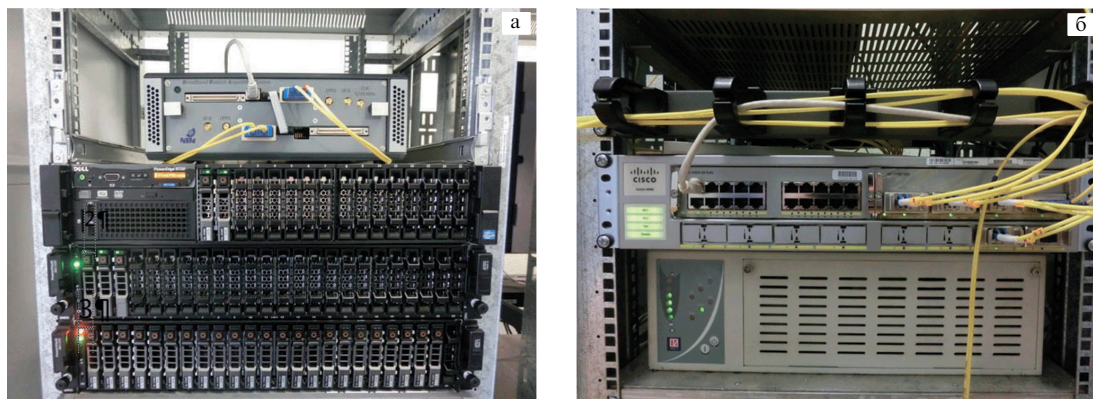


Рис. 4. (а) Прототип системы буферизации и передачи данных. (б) Двухканальная широкополосная система преобразования сигналов.

пускной способностью  $10 \text{ Гбит с}^{-1}$  через коммутатор c4900M высокоскоростным протоколом Tsunami-UDP.

Скорость записи смоделированных 60 сканов в течение одного часа (эмуляция данных от 8 каналов широкополосной системы преобразования сигналов по 10 Гбайт суммарным объёмом 80 Гбайт) составила порядка  $20 \text{ Гбит с}^{-1}$ .

#### 7. Программный коррелятор для обработки данных радиоинтерферометра нового поколения

С точки зрения систем первичной обработки, основное отличие радиоинтерферометра нового поколения заключается в существенном возрастании ширины полос пропускания частотных каналов и скорости поступления данных на коррелятор. На каждой станции сигналы квазаров оцифровываются двухбитовым квантованием и регистрируются в 4-частотных каналах в одной поляризации с шириной полосы пропускания 1024 МГц или в двух поляризациях с шириной полосы пропускания по 512 МГц. Суммарный поток данных от каждой станции составляет около  $16 \text{ Гбит с}^{-1}$ .

Для оперативной обработки РСДБ-данных малых антенн разрабатывается коррелятор нового поколения [12]. Коррелятор способен обрабатывать данные от шести станций в режиме квазиреального времени. Средняя скорость обработки данных равна средней скорости поступления данных на вход коррелятора — до  $96 \text{ Гбит с}^{-1}$ . Для фильтрации узкополосных помех в частотных каналах с широкими полосами пропускания коррелятор будет вычислять кросс-спектры РСДБ-сигналов с высоким разрешением — до 4096 точек спектра.

В качестве алгоритма обработки РСДБ-данных выбран FX-алгоритм (FX — Foreign Exchange), позволяющий увеличивать разрешение вычисляемых кросс-спектров при невысоком увеличении трудоёмкости вычислений. Коррелятор разрабатывается как программный, т.е. для его аппаратного обеспечения используются только стандартные, серийно изготавливаемые вычислительные системы. Основным отличием разрабатываемого коррелятора от существующих в мире РСДБ-корреляторов является реализация наиболее трудоёмких вычислений — выделения сигналов ГПИ (генератора пикосекундных импульсов) и вычислений кросскорреляционных спектров — на графических процессорных ускорителях (ГПУ) "Nvidia Tesla". Использование ГПУ

позволяет существенно уменьшать размеры аппаратного обеспечения коррелятора.

В качестве типа аппаратного обеспечения выбран процессорный кластер на гибридных блейд-серверах модели V200F корпорации "Т-Платформы". Каждый блейд-сервер содержит два ЦПУ "Intel® Xeon® E5 2600" и два ГПУ "NVIDIA Tesla™" класса М. Между собой блейд-серверы связаны высокоскоростной локальной сетью стандарта InfiniBand через коммутатор "Mellanox", что позволяет любым двум блейд-серверам обмениваться данными на скорости до  $56 \text{ Гбит с}^{-1}$ .

Программное обеспечение (ПО) коррелятора включает в себя ПО формирования задания на обработку, ПО, осуществляющее обработку высокоскоростных входных потоков данных, и постпроцессорное ПО. Наиболее сложным является ПО, осуществляющее обработку высокоскоростных входных потоков данных. Его структура и взаимодействие с аппаратным обеспечением коррелятора показаны на рис. 5. ПО включает в себя модули нескольких типов. Вычислительные операции реализованы в станционных и корреляционных модулях (СМ и КМ), каждый из которых реализован на одном блейд-сервере. Число станционных модулей равно числу станций, данные каждой из которых обрабатываются одним модулем. Сигналы декодируются и смещаются на геометрическую задержку станции. Смещение данных производится в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) блейд-сервера, имеющем 64 Гбайта оперативной памяти, что позволяет накапливать данные в течение 30 с. При необходимости накапливаемые данные могут сохраняться в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) кластера. Выходной поток станционного модуля, передаваемый по InfiniBand, равен входному потоку величиной  $16 \text{ Гбит с}^{-1}$ .

Далее данные передаются на корреляционные модули, на каждый модуль поступают данные одного частотного диапазона всех станций, входной поток данных всех корреляционных модулей одного диапазона  $24 \text{ Гбит с}^{-1}$ . Каждый частотный диапазон обрабатывается несколькими модулями, общим числом  $L$ , но не более 10. Корреляционный модуль получает блок данных за период накопления, например 1 с. Следующий блок получит данные следующего периода накопления и т.д. Когда данные будет получать  $L$ -й модуль, первый модуль успеет обработать свой блок данных, выгрузить результаты и приготовиться к приёму очередного блока.

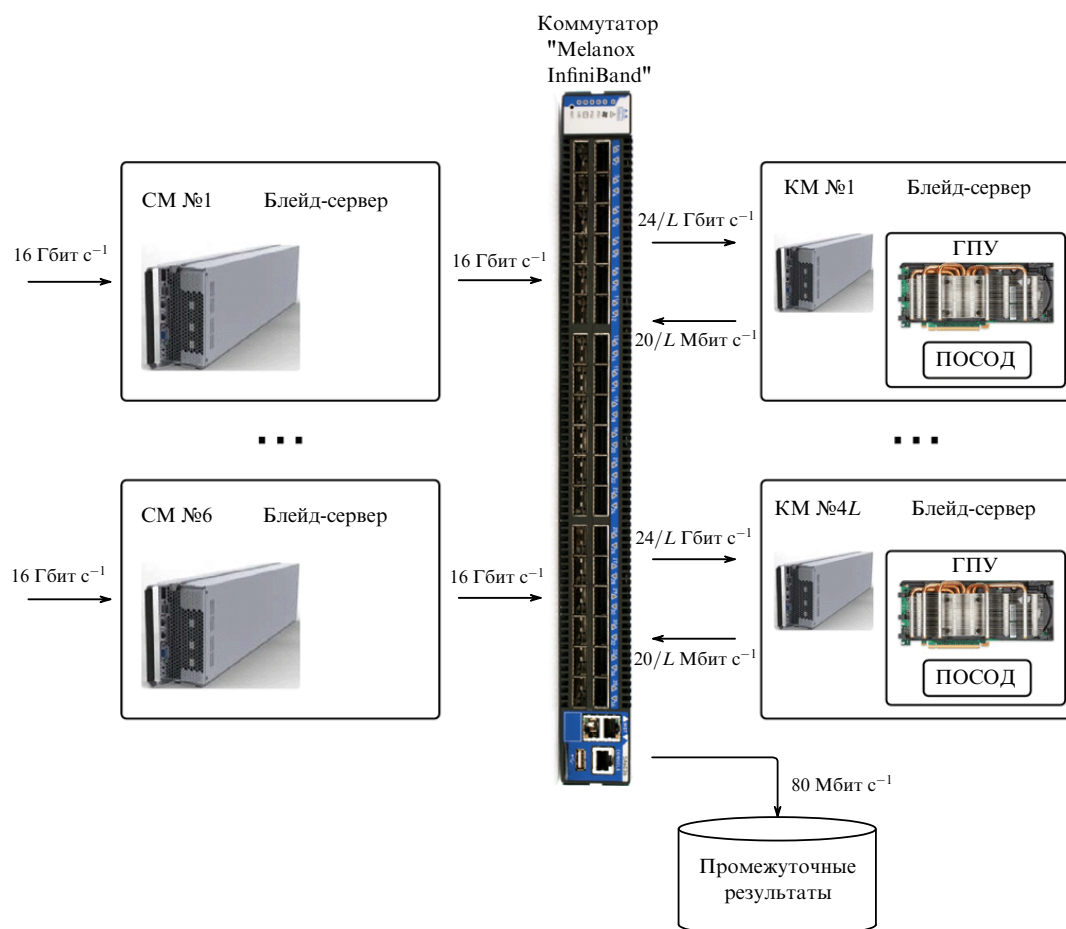


Рис. 5. Структура и взаимодействие аппаратного и программного обеспечения 6-станционного коррелятора.

В корреляционном модуле данные обрабатываются в ГПУ специальным программным обеспечением спектральной обработки данных (ПОСОД). Вычисляются кросскорреляционные функции и выделяются сигналы ГПИ. Результаты работы ГПУ — потоки данных со средней скоростью до  $20 \text{ Мбит с}^{-1}$  на один частотный диапазон — выгружаются в оперативную память корреляционных модулей, через локальную сеть передаются на рейд-массив процессорного кластера и сохраняются. Вычисленные точные значения групповых задержек передаются в центр обработки и анализа данных.

#### 8. Система измерения электрических характеристик атмосферы

Система измерения электрических характеристик атмосферы (СИЭХА) представляет собой аппаратно-программный комплекс, предназначенный для оперативного определения переменной составляющей тропосферной задержки распространения сигнала, обусловленной вариациями интегрального содержания водяного пара вдоль луча зрения антенной системы [13]. Определение тропосферной задержки основано на том, что яркостная температура тропосферы на волнах, близких к резонансной частоте водяного пара ( $22,235 \text{ ГГц}$ ), и переменная компонента тропосферной задержки являются функциями интегрального влагосодержания на луче зрения антенны.

СИЭХА, построенная по классической для данного класса устройств схеме, имеет двухканальный радио-

метр, работающий на частотах  $20,4 \text{ ГГц}$  и  $31,7 \text{ ГГц}$  с шириной полосы  $500 \text{ МГц}$ , со встроенными средствами калибровки мощности принимаемых сигналов, две рупорно-линзовые антенны, диаграммы направленности которых отклоняются в пределах  $180^\circ$  поворотным плоским перископическим зеркалом, установленным под углом  $45^\circ$  к горизонту. Полуширина диаграммы направленности рупорных облучателей составляет  $6^\circ$ . СИЭХА установлена на азимутальное опорно-поворотное устройство, что позволяет наводить диаграмму направленности рупорно-линзовой антенны в любую точку полусферы.

Оба канала радиометра построены по идентичной схеме. На входе сверхвысокочастотного блока установлены два ферритовых Y-переключателя, последовательно подключающие к входу малошумящего усилителя сигналы антенны и попеременно одну из двух калибровочных согласованных нагрузок, находящихся при температуре  $T_1 = 40,000 \pm 0,007^\circ\text{C}$  ("холодная" нагрузка) и  $T_2 = 65,000 \pm 0,007^\circ\text{C}$  ("тёплая" нагрузка). В качестве малошумящего усилителя использованы серийные конвертеры сигналов в диапазон промежуточных частот. На выходе конвертеров установлен субблок, содержащий усилители промежуточной частоты, квадратичные детекторы и усилители тока детектора. С выхода усилителя тока детектора сигнал подаётся на систему регистрации данных.

Погрешность измерения относительных вариаций задержки, которая определяется в основном чувстви-



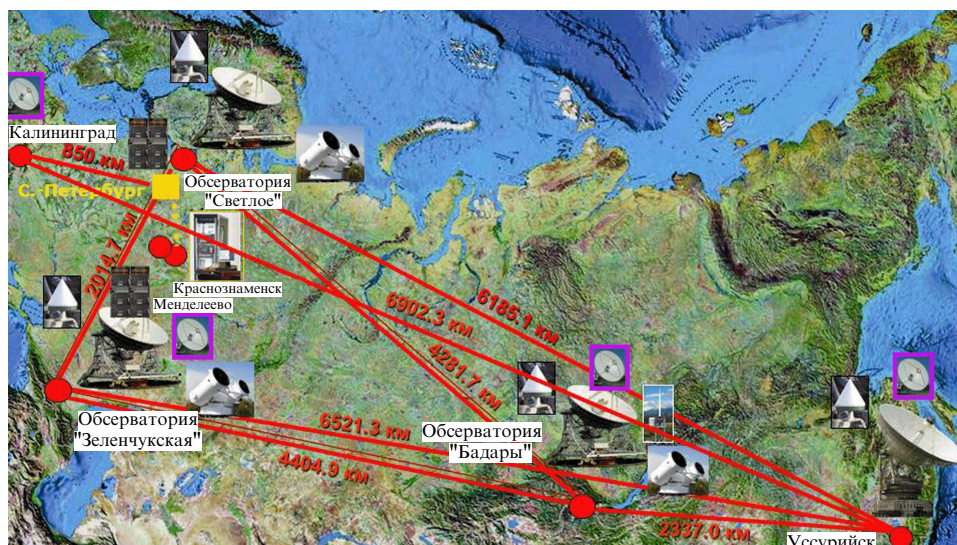


Рис. 6. Радиоинтерферометрический комплекс "Квазар-КВО" — 2020 год.

тельностью к изменениям яркостной температуры атмосферы и стабильностью параметров радиометров, не превышает 0,5 К (при эффективном времени усреднения сигнала 1 с).

## 9. Заключение

В результате реализации проекта радиоинтерферометрический комплекс "Квазар-КВО" (рис. 6) будет модернизирован для проведения фундаментальных исследований на субмиллиметровом уровне точности и для оперативного определения всемирного времени с погрешностью не более 10 мкс в режиме реального времени в интересах ГЛОНАСС. Модернизация позволит комплексу "Квазар-КВО" работать в составе международных (глобальных) радиоинтерферометрических сетей нового поколения, что обеспечит контроль получаемых данных о параметрах вращения Земли и системах координат.

## Список литературы

1. Финкельштейн А М и др., в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 13 (Под ред. А М Финкельштейна) (СПб.: Наука, 2005) с. 7
2. Федеральная целевая программа "Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы", утверждена Постановлением Правительства Российской Федерации № 189 от 3 марта 2012 г.
3. Финкельштейн А М и др., в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 23 (Под ред. А В Ипатова) (СПб.: Наука, 2012) с. 55
4. Dick W R, Richter B (Eds) *IERS Annual Report 2008-09* (Intern. Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau) (Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012), Electronic version published on December 23, 2011
5. Plag H-P, Pearlman M (Eds) *Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of Global Society on a Changing Planet in 2020* (New York: Springer, 2009)
6. Hase H et al., in *Measuring the Future. Proc. of the Fifth IVS General Meeting* (Eds A Finkelstein, D Behrend) (St. Petersburg: Nauka, 2008) p. 109
7. Ипатов А В, Чернов В К, в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 21 (Под ред. А М Финкельштейна) (СПб.: Наука, 2010) с. 69
8. Ипатов А В и др., в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 2 (Под ред. А М Финкельштейна) (СПб.: Наука, 1997) с. 232
9. Карпичев А С, Иванов Д В, в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 24 (Под ред. А В Ипатова) (СПб.: Наука, 2012) с. 233
10. Ипатов А В, Кольцов Н Е, Федотов Л В *Приборы и техника эксперимента* (6) 140 (2006)
11. Федотов Л В и др., в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 24 (Под ред. А В Ипатова) (СПб.: Наука, 2012) с. 165
12. Суркис И Ф и др., в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 24 (Под ред. А В Ипатова) (СПб.: Наука, 2012) с. 172
13. Быков В Ю, Ильин Г Н, Кайдановский М Н, в сб. *Труды Института прикладной астрономии РАН* Вып. 21 (СПб.: Наука, 2010) с. 255