

УДК 520.274

НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКИЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР “РАДИОАСТРОН”

© 2014 г. В. В. Андреянов¹, Н. С. Кардашев¹, В. В. Хартов²

¹ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

² НПО им. С.А. Лавочкина, г. Химки

andre@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 16.12.2013 г.

В статье рассматриваются устройство, особенности и характеристики российского наземно-космического радиointерферометра со сверхдлинными базами (КРСДБ) “РадиоАстрон”.

DOI: 10.7868/S002342061405001X

ВВЕДЕНИЕ

В XX веке исследования Вселенной распространились на все диапазоны электромагнитного излучения. Кроме оптической астрономии возникли гамма, рентгеновская, инфракрасная и радиоастрономия. Это привело к необычайному расширению предела познания Вселенной, вплоть до возникновения модели Вселенной как целого, понимания законов возникновения и эволюции большинства астрономических объектов. Однако многие ключевые вопросы астрономии все еще остаются нераскрытыми и возникли новые крупные проблемы, включая возможность существования многоэлементной Вселенной.

Прогресс в астрономии тесно связан как с возможностью проводить исследования из космоса, так и с появлением новых технологий создания телескопов и методов анализа излучений во всех диапазонах.

Основными параметрами, ограничивающими исследования в радиоастрономии, являются чувствительность и угловое разрешение. Оба эти параметра имеют огромные перспективы только в космосе. Чувствительность радиотелескопа, в основном, определяется площадью его антенны и шумами приемников. Угловое разрешение первоначально также ограничивалось размерами антенны, но с применением интерферометрического метода эта связь была исключена. Разрешение стало определяться расстоянием между антеннами. С появлением возможности регистрации сигналов в цифровом виде и последующей их обработки на ЭВМ, а также применением высокостабильных генераторов, позволяющих привязать по частоте и времени регистрируемые сигналы на разных телескопах, возникли радиointерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ). Базы таких систем уже к концу XX века достигли величины

10 тыс. км (порядка диаметра Земли). В результате РСДБ исследований было выявлено, что многие из наиболее интересных астрономических объектов (ядра активных галактик – квазары, нейтронные звезды – пульсары, области звездообразования – космические мазеры) очень компактны и не разрешаются интерферометрами с наземными базами. В связи с этим уже в 70–80-х годах прошлого века начались разработки проектов интерферометров с базой Земля–Космос [1]. Эти проекты широко обсуждались на международных конференциях. С целью подготовки к реализации первого наземно-космического интерферометра на борту пилотируемой космической станции *Салют-6* космонавтами В.А. Ляховым и В.В. Рюминым был развернут макет параболической антенны радиотелескопа КРТ-10 (с диаметром 10 м) с сетчатой отражающей поверхностью [2]. Телескоп работал в диапазонах 12 и 72 см на высоте 400 км с июля по август 1979 г.

По результатам проведенных измерений по космическим радиоисточникам было принято решение о проектировании телескопа с большей точностью поверхности, т.к. необходимо проводить исследования для самых коротких волн сантиметрового диапазона, или даже на еще более коротких волнах (большая прозрачность самих исследуемых источников и более высокое разрешение).

В апреле 1979 г. Институт космических исследований и НПО им. С.А. Лавочкина начали разрабатывать технические предложения о создании наземно-космического интерферометра с базой намного больше диаметра Земли для проведения радиоастрономических наблюдений в диапазонах от 1 см до 1 м [3, 4].

В мае 1980 г. вышло постановление Правительства СССР о разработке в последующую десяти-

Таблица 1

$f_{\text{ср}}$	22.232 ГГц	4.832 ГГц	1664 МГц	324 МГц
Δf	8 полос в границах 7 ГГц	100 МГц	100 МГц	16 МГц
ΔF_c	32 МГц \times 2	32 МГц \times 2	32 МГц \times 2	16 МГц \times 2

летку в НПО им. С.А. Лавочкина совместно с АН СССР 6-ти автоматических космических обсерваторий. В 1983 г. был уточнен план запусков, в частности, *Астрон-Р* (кратчайшие волны сантиметрового диапазона) – в 1987–1988 гг., *Астрон-М* (более короткие волны) – в 1990 г.

Первое международное совещание по наземно-космическому интерферометру “РадиоАстрон” состоялось в Москве 17–18 декабря 1985 г. Были определены основные диапазоны (1.35, 6.2, 18 и 92 см) космического радиотелескопа. Обсуждались остальные параметры интерферометра, в частности, связанные с выбором его орбиты. К моменту радикальных изменений в стране было проведено несколько таких совещаний. 21 октября 1991 г. под Москвой, в г. Пушкино (радиообсерватория Астрокосмического центра ФИАН) прошло уже 13-е международное совещание. В 2003–2004 гг. в Пушкино были проведены испытания уже собранного космического радиотелескопа на всех диапазонах, и макет был передан для совместных испытаний с космическим аппаратом *Спектр-Р* [5–7].

18 июля 2011 г. состоялся успешный запуск космического радиотелескопа ракетой “Зенит-3Ф” с разгонным блоком “Фрегат-СБ” с космодрома Байконур. Раскрытие параболической антенны и первые испытания, включая режим одиночного радиотелескопа и интерферометра, также успешно были проведены в 2011 г. В дальнейшем были проведены успешные испытания на всех диапазонах космического радиотелескопа, которые подтвердили его работоспособность как крупнейшей жесткой космической антенны диаметром 10 м, так и крупнейшего интерферометра с базой до 350 тыс. км. Для систематических радиоастрономических исследований была организована международная кооперация, охватывающая все континенты и включающая более 30 наземных радиотелескопов, и две станции сбора информации (Пушино в России и Грин Бэнк в США) [8], <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/index.html>. Международный программный комитет ведет отбор заявок на проведение исследований.

Работу этого радиотелескопа на орбите обеспечивает многофункциональная космическая платформа “Навигатор”, на которой он и установлен.

Подготовка и проведение исследований с наземно-космическим интерферометром “РадиоАстрон”, описанные в последующих статьях, представляют интерес для дальнейшего развития

этого направления (создание интерферометра Земля – Космос на более коротких волнах и с большими базами – проект “Миллиметр” Российской космической программы) [9], <http://asc-lebedev.ru/index.php>. Весьма важной является перспективная возможность создания в космосе жестких зеркальных антенн более высокой точности также для работы на более коротких волнах, вплоть до инфракрасного диапазона. В перспективе также создание очень больших антенн и многоэлементных интерферометров с чисто космическими базами [10, 11].

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОТЛИЧИЯ КРСДБ ОТ РСДБ

Для одиночного телескопа угловое разрешение $\theta = \lambda/D$, где D – эффективный диаметр телескопа. Для КРСДБ $\theta = \lambda/B_1$, где B_1 – проекция базы B пары радиотелескопов (космического – КРТ и земного – ЗРТ) на картинную плоскость, перпендикулярную направлению на источник S (рис. 1). Конфигурация и состав КРСДБ “РадиоАстрон” показаны на рис. 1. Видно, что отличительной его особенностью является плечо КРСДБ от космического радиотелескопа до выходов станции слежения (СС). КРТ также как и ЗРТ принимает излучение источника в радиоастрономических диапазонах из направления S , далее преобразует его в необходимую форму и передает в реальном времени по радиолинии связи в направлении R на Землю, где восстанавливается и помещается в регистратор данных на СС (см. рис. 2). Поэтому все факторы, изменяющие входную фазу источника на пути к выходу СС (по временным задержкам и частотным сдвигам) должны учитываться в процессе корреляции с данными от ЗРТ. В табл. 1 приведены средние частоты $f_{\text{ср}}$ настройки приемников КРТ, полосы частот приема по входу Δf и используемые для корреляционной обработки видео полосы ΔF_c . Множитель 2 в третьей строке означает, что прием радиоизлучения может производиться одновременно в двух круговых поляризациях (левой и правой). Как видно, КРСДБ – это суперсистема синхронно действующих радиотелескопов (КРТ и ЗРТ), средств передачи данных от КРТ на Землю (на СС) и доставки их для корреляционной обработки с минимальной затратой времени. Задачей интерферометра, как фазовой системы, является достижение наилучшей разрешающей способности $\theta = \lambda/B_1$ при ис-

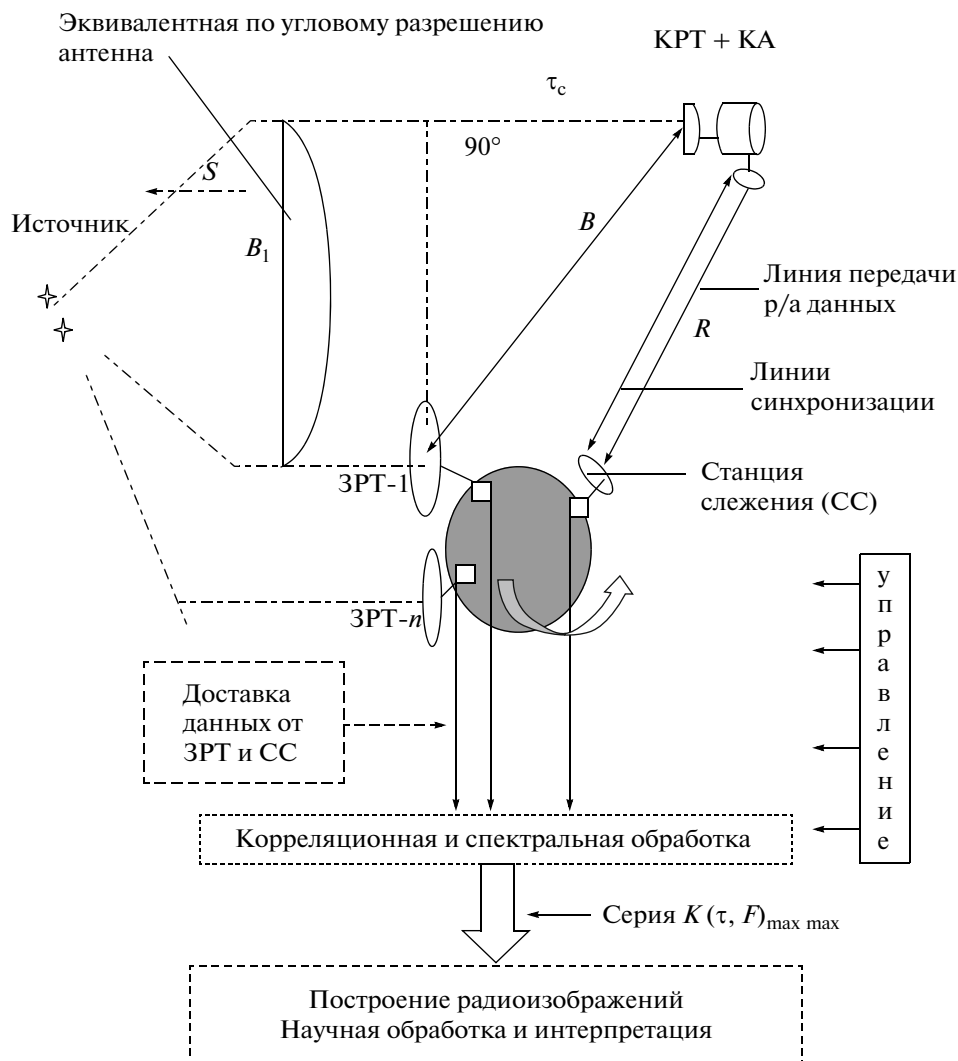


Рис. 1. Конфигурация и основные сегменты КРСДБ.

τ_c — разница геометрических (в вакууме) задержек от источника до КРТ и ЗРТ, $K(\tau, F)_{\max \max}$ — максимальные значения корреляции по задержке и частоте интерференции.

следовании небесных объектов на выбранной длине волны λ . Измеренная разность фаз излучений источника, достигающих телескопов в один и тот же момент, может отличаться от чисто геометрической (в вакууме) $\Delta\varphi_c$ наличием вредных составляющих $\Sigma\Delta\varphi_i$. В наземных РСДБ база B между телескопами ЗРТ во время наблюдений не меняется, а проекция базы B_1 меняется благодаря вращению Земли медленно и по хорошо известному закону. Часы на ЗРТ (обычно водородные) периодически сверяются с помощью систем GPS или UT, поэтому ошибка сверки часов обычно не превышает 10–100 наносек. Принятые телескопами данные вместе с текущим временем $t_{\text{ЗРТ}}$ записываются в регистраторы для доставки на коррелятор, а в системе VLBA передаются по линиям связи [12]. Таким образом, измеряемая разность

фаз может отличаться от геометрической лишь за счет ошибки сверки часов и возможного различия влияния на фазу атмосферы Земли в местах расположения ЗРТ. В КРСДБ база между телескопами КРТ и ЗРТ и ее проекция B_1 непрерывно и быстро меняются за счет орбитального движения КРТ и вращения Земли. Данные от КРТ специальным образом преобразуются в помехоустойчивые потоки дискретных данных и передаются в реальном времени на СС по радиолинии f_0 на несущей 15 ГГц. Там они декодируются, восстанавливаются и регистрируются вместе с текущим временем $t_{\text{СС}}$ по часам СС (см. рис. 2). Часы СС сверяются с часами ЗРТ, но время на КРТ $t_{\text{КРТ}} = t_{\text{СС}} - \Delta t_{\text{КРТ-СС}}$ остается неопределенным из-за изменяющейся задержки $\Delta t_{\text{КРТ-СС}}$ в радиоканале КРТ-СС.

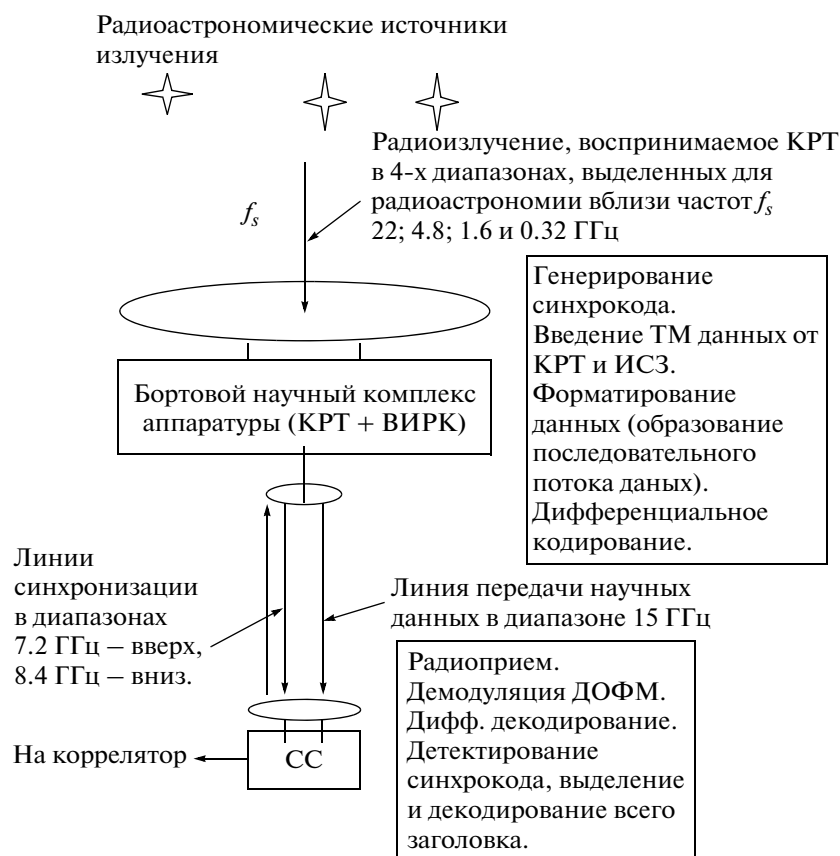


Рис. 2. Космическое плечо КРСДБ “РадиоАстрон”.

На схеме справа в рамках перечислены действия, которые выполняются на КРТ и СС для передачи данных от КРТ по радиоканалу.

Для определения текущих значений $\Delta t_{\text{КРТ-СС}}$ точнее и значительно чаще, чем по баллистическому прогнозу, служит двухсторонняя когерентная линия синхронизации (фазовая петля СС-КРТ-СС) [13]. Все частоты связи КРТ со СС выбраны по Регламенту МККР (Международный комитет космической радиосвязи). Доставка данных на корреляционную обработку от СС и ЗРТ производится на носителях их Регистраторов или по линиям Интернет. Для получения корреляции данных, КРТ и все ЗРТ должны также быть функционально и по ряду параметров идентичными: работать в одинаковых диапазонах частот и одинаковых поляризациях, иметь одинаковые регистрируемые полосы частот и положение частот гетеродинов, а также известные аппаратурные задержки. Сумма фазовых ошибок, добавляемых к геометрической разности фаз $\Delta \varphi_{\text{геом}}$, определяется “вредными” задержками по времени и частотными сдвигами по пути к коррелятору.

2. КОСМИЧЕСКИЙ РАДИОТЕЛЕСКОП

Ключевым, новым сегментом радиоинтерферометра является космический радиотелескоп

КРТ, представляющий собой радиоприемный электронный комплекс с раскрывающейся в космосе (27 жестких углепластиковых лепестков) точной 10-метровой параболической антенной. Космический телескоп является полезной нагрузкой высокоорбитального спутника *Спектр-Р*. Он выведен на высокоэллиптическую орбиту спутника Земли с апогеем около 350 тыс. км для наблюдения небесных источников синхронно с сетью наземных радиотелескопов. КРТ связан со станцией слежения через бортовые средства высокоинформационного радиокомплекса (ВИРК). Интерферометр при таких базах обеспечивает информацию с рекордным угловым разрешением до 10 мкс дуги (для самой короткой длины волны $\lambda = 1.35$ см). Для сравнения самые мощные наземные оптические системы имеют разрешающую способность 0.1–0.01 угловой секунды.

Системы КРТ выполняют следующие функции (см. рис. 3): прием и усиление радиоизлучения обеих поляризаций от исследуемого галактического или внегалактического источника (антенна и приборы “холодной плиты”), перенос частотного спектра полученных сигналов в видео

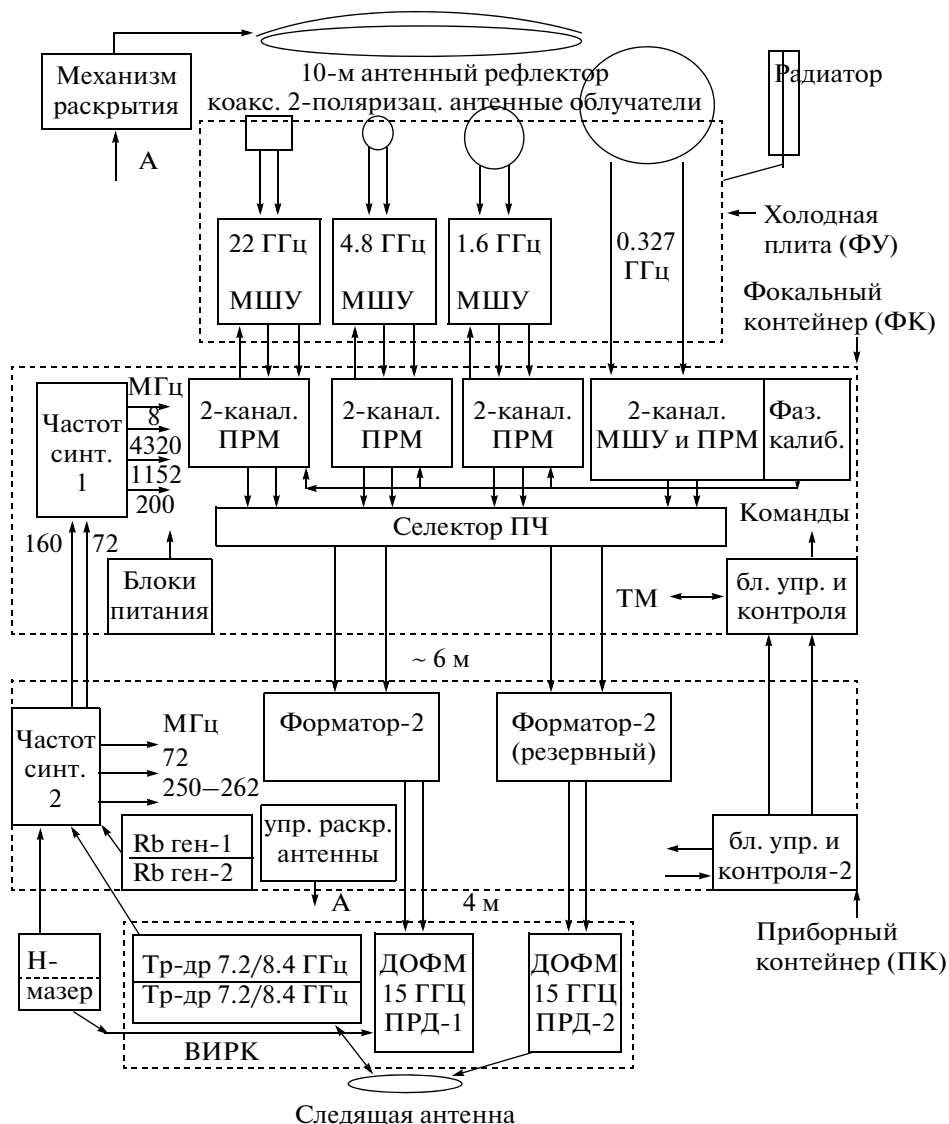


Рис. 3. Блок-схема КРТ и ВИРК.

Обозначения: МШУ – маломощный усилитель, ФУ – фокальный узел, содержащий блок антенных облучателей и МШУ, ПРМ – приемник радиоастрономический, ПЧ – промежуточная частота, ТМ – телеметрия, Rb ген-1,2 – рубидиевые генераторы, Н-мазер – водородный генератор (2 экземпляра), ВИРК – высоко-информативный радиокомплекс, Тр-др 7,2/8,4 – транспондер входной частоты 7.2 ГГц в выходную – 8.4 ГГц, ПРД-1,2 – передатчики астрономических данных на несущей 15 ГГц.

область без потери фазы принятых сигналов (приборы фокального и приборного контейнеров), преобразование этих сигналов вместе с собственными шумами КРТ в бинарную форму, образование потоков цифровых данных (приборный контейнер), передачу их на наземную станцию слежения по радиоканалу с несущей $f_0 = 15$ ГГц, а также формирование фазовой петли на тоновых сигналах 7.2075/8.4 ГГц (комплекс ВИРК со следящей за СС антенной).

Как видно из схемы КРТ на рис. 3 в основном, интерферометрическом, режиме участвуют все подсистемы и приборы, кроме резервных и тех 2-х

или 3-х приемников, в диапазоне которых не проводится текущее наблюдение.

Для работы приемников в ФК и Форматора в ПК необходимы гетеродинные и тактовые сигналы. Их формирование в синтезаторах частот 1 и 2 (БФГСВЧ и БФГТЧ) может происходить либо от опорного сигнала с выхода транспондера фазовой петли (15 МГц), принятого от СС, либо от автономного бортового рубидиевого генератора, либо от автономного бортового Н-мазера (15 МГц). Синтезатор-2 формирует тактовые частоты 64 и 72 МГц и 4 гетеродинных частоты 250, 254, 258 и 262 МГц для Форматора, также частоты 64 и

Таблица 2

1	Наведение на источник (обеспечивает КА)	3-осная стабилизация, точность наведения: ± 2 угл. мин, ошибка стабилизации: ± 32 угл. с, макс. скорость переориентации 0.1 град/с
2	Антенна КРТ	Диаметр 10 м, раскрывающаяся, параболическая. Облучатели – коаксиальные, в первичном фокусе, с выходами правой и левой круговой поляризации. Макс. отклонение от параболической формы ~ 2 мм
3	Диапазоны входных частот и используемые полосы	324 ± 8 , 1664 ± 32 , 4832 ± 32 , 22232 ± 32 МГц (18–25 ГГц – для режима многочастотного синтеза)
4	Шумовые температуры системы КРТ в указанных диапазонах	< 200 , < 45 , < 130 , $< 80^\circ$ К
5	Эффективные площади антенны в указанных диапазонах	$> 30 \text{ м}^2$, $> 41 \text{ м}^2$, $> 35 \text{ м}^2$, $> 7.5 \text{ м}^2$
6	Частоты гетеродинов для обоих каналов приемников в указанных диапазонах	200, 1152, 4320, 21720 (4320) МГц
7	Гетеродинные частоты видео конверторов Форматора	500 (250 \times 2); 508 (254 \times 2); 516 (258 \times 2); 524 (262 \times 2) МГц
8	Источники опорных частот для всех частотных преобразований и их стабильность	Рубидиевый генератор 5 МГц: 10^{-12} за 100 с; Водородный генератор 5 и 15 МГц: $5 \cdot 10^{-15}$ за 1000 с; Опорный сигнал от СС (на выходе транспондера ВИРК): 15 МГц с ошибкой остаточного Доплера
9	Параметры ВИРК	Частоты линии синхронизации со СС: 7.2075 ГГц – вверх, 8.4 ГГц – вниз, мощность 1–4 Вт (несущая). Передатчик научных данных: модуляция ДОФМ 15 ГГц, мощность – 40 (4)Вт; скорости передачи 2 \times 72 Мбод, или 2 \times 18 Мбод, антенна следящая, диаметр 1.5 м
10	Число команд управления – УКС – функциональных	300 124
11	Потребляемая мощность 27 В от борт-сети	< 1150 Вт (зависит от режима)
12	Масса КРТ (с ВИРК)	< 2500 кг
13	Размеры в сложенном положении (без ВИРК)	Длина 7460 мм, диаметр 3550 мм
14	Орбита	Апогей – около 350 тыс. км, наклонение 79.70 (на апрель 2012), период 8.5 суток, начальная высота перигея – 500 км
15	Наилучшее угловое разрешение интерферометра	8 угловых мкс (в диапазоне 1.35 см)
16	Наилучшая чувствительность интерферометра КРТ – ЗРТ (VLA)	10 мЯн

160 МГц для дальнейшего образования в Синтезаторе-1 частот для гетеродинов приемников (200, 1152, 4320 МГц). Таким образом, сигнальный тракт КРТ оказывается готовым к приему сигналов от бортовых антенных облучателей (БАО). Сигналы с каждого из разнополяризованных выходов БАО усиливаются малошумящими усилителями (МШУ) и поступают через герморазъемы ФК на входы 2-канальных приемников; в диапазоне 324 МГц МШУ не охлаждается и размещается непосредственно в приемнике этого диапазона

в ФК. Перенесенные на промежуточную частоту (около 512 МГц) спектры принятых сигналов вместе с собственными шумами КРТ с пары выходов каждого приемника поступают на Селектор (на схеме – Селектор ПЧ). В зависимости от выбранного режима наблюдений Селектор по командам выбирает любые 2 канала (2 от одного любого ПРМ, или по одному от любых 2-х ПРМ, или один любой выход ПРМ передается на два выхода Селектора) и подает их на выходные разъемы ФК. Далее по жестким коаксиальным кабелям, проло-

женным вдоль штанг, эти сигналы вводятся в ПК и подаются на входы Форматора (второй находится в холодном резерве). Там они преобразуются в видео диапазон и в цифровой вид. Далее уплотняются в два последовательных бинарных потока данных, куда также добавляется помехоустойчивый синхрокод и другие данные, образуя формат данных КРТ [13]. Оба потока (I и Q) по парафазной схеме выводятся из ПК и по кабелям одинаковой длины передаются на входы модулятора ПРД 15 ГГц ВИРК. Далее модулированные ДОФМ (двойная относительная фазовая модуляция) сигналы через следящую за СС антенну ВИРК передаются на Землю. Указанная модуляция позволяет в единой частотной полосе передавать 2 потока данных одновременно со скоростью 72 Мбит/с каждый. Слежение антенны за выбранной СС и ее переориентация на другую СС должны выполняться программным способом от бортовой ЭВМ КА и инициироваться командами. Первые 2 года миссии использовалась лишь одна, российская СС в Пуццо. В конце 2013 года вошла в строй СС в США (Green Bank).

В табл. 2 приводятся значения заложенных в проекте параметров КРТ и КРСДБ, обеспечивающих достижение научных целей миссии — получить изображения, координаты и эволюцию угловой структуры небесных радиоисточников во Вселенной со сверхвысоким угловым разрешением, а также провести гравитационные эксперименты.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Достигнуто сверхвысокое угловое разрешение радиоастрономических источников за счет фундаментальных различий КРСДБ и наземных РСДБ: размещение КРТ на орбите ИСЗ, создание радиокомплекса связи с Землей (с СС), специальное преобразование сигналов от КРТ для передачи на СС и восстановление их для корреляции с данными от ЗРТ.

2) Создан 4-х диапазонный КРТ (от 1.35 см до 92 см) на раскрывающейся в космосе 27-лепестковой антенне и радиационно охлаждаемых МШУ.

3) Энергетический потенциал связи с Землей допускает передачу данных от КРТ со скоростью до (72×2) Мбит/с в двух эллиптических поляризациях.

4) Возможна синхронизация КРТ (и бортовых передатчиков) через фазовую петлю от водородных часов СС, которые, в свою очередь сверяются с часами ЗРТ. Предусмотрена также синхронизация от автономного бортового Н-мазера или ру-

бидиевого генератора, что дает надежду провести гравитационные эксперименты.

Проект “РадиоАстрон” осуществляется Астро-космическим центром ФИАН им. П.Н. Лебедева и НПО им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно со многими научно-техническими организациями в России и других странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кардашев Н.С., Парийский Ю.Н., Соколов А.Г. Космическая радиоастрономия // УФН. 1971. Т. 104. С. 328–331.
2. Арсентьев В.М., Бержатый В.И. и др. Космический радиотелескоп КРТ-10 // ДАН СССР. 1982. Т. 264. С. 588–591.
3. Андреев В.В., Кардашев Н.С. и др. “Радиоастрон” — радиоинтерферометр с базой Земля–Космос // Астрон. ж. 1979. Т. 63. С. 850–855.
4. Андреев В.В., Бирюков А.В. и др. Многочастотный прием для синтеза изображений в проекте “Радиоастрон” // Труды ФИАН. 2000. Т. 228. С. 13–22.
5. Александров Ю.А., Андреев В.В., Кардашев Н.С. и др. Радиоастрон (проект “Спектр-Р”) — радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 3. С. 11–18.
6. Александров Ю.А., Бабакин Н.Г., Бабышкин В.Е. и др. Радиоастрон (проект “Спектр-Р”) — радиотелескоп много больше Земли. Наземный сегмент и основные направления научных исследований // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 3. С. 19–30.
7. Авдеев В.Ю., Зеленый Л.М., Кардашев Н.С. и др. Космическая миссия “Радиоастрон”. Первые результаты // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 3. С. 4–21.
8. Кардашев Н.С., Хартов В.В. и др. “Радиоастрон” — телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. ж. 2013. Т. 90. С. 179–222.
9. Кардашев Н.С., Андреев В.В. и др. Проект “Миллиметр” // Труды ФИАН. 2000. Т. 228. С. 112–128.
10. Буйкас В.И., Гвамичава А.С. и др. Неограниченно наращиваемый космический радиотелескоп // Космич. исслед. 1978. Т. 16. С. 767. (Cosmic Research. P. 621).
11. Gvamichava A.S., Buyakas V.I. et al. Design problems of large space mirror radiotelescopes // Acta Astronautica. 1981. Т. 8. С. 337–348.
12. Andreyanov V.V. Compatibility problems of RADIO-ASTRON, VSOP, VLBI and VLBA // Frontiers of VLBI / Edited by H. Hirobayashi, M. Inoue, H. Kobayashi. Universal Academy Press. Inc. 1991. P. 163–167, Tokyo, Japan.
13. Andreyanov V.V. Radio Telescope in the Sky // Science in Russia. 1993. № 3–4. P. 8–13.