

УДК 520.27+520.872+520.876

“РАДИОАСТРОН” – ТЕЛЕСКОП РАЗМЕРОМ 300 000 км: ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2013 г. Н. С. Кардашев^{1*}, В. В. Хартов², В. В. Абрамов³, В. Ю. Авдеев¹,
А. В. Алакоз¹, Ю. А. Александров¹, С. Анантакришнан⁴, В. В. Андреянов¹,
А. С. Андрианов¹, Н. М. Антонов¹, М. И. Артюхов², М. Ю. Архипов¹, В. Баан⁵,
Н. Г. Бабакин¹, В. Е. Бабышкин², Н. Бартель²⁶, К. Г. Белоусов¹, А. А. Беляев⁶,
И. И. Берулис¹, Б. Ф. Бёрк⁷, А. В. Бирюков¹, А. Е. Бубнов⁸, М. С. Бургин¹, Дж. Буска⁹,
А. А. Быкадоров¹⁰, В. С. Бычкова¹, В. И. Васильков¹, К. Дж. Веллингтон¹¹,
И. С. Виноградов¹, Р. Витфилд¹², П. А. Войцик¹, А. С. Гвамичава¹, И. А. Гирин¹,
Л. И. Гурвиц^{13,14}, Р. Д. Дагкесаманский¹, Л. Д’Аддарио¹², Г. Джиованини^{15,16},
Д. Л. Джонси¹¹, П. Дьюдни¹⁷, А. А. Дьяков¹⁸, В. Е. Жаров¹⁹, В. И. Журавлев¹,
Г. С. Заславский²⁰, М. В. Захваткин²⁰, А. Н. Зиновьев¹, Ю. Илинен²¹, А. В. Ипатов¹⁸,
Б. З. Каневский¹, И. А. Кнорин¹, Ж. Л. Кассе¹³, К. И. Келлерманн²², Ю. А. Ковалев¹,
Ю. Ю. Ковалев^{1,23}, А. В. Коваленко¹, Б. Л. Коган²⁴, Р. В. Комаев², А. А. Коноваленко²⁵,
Г. Д. Копелянский¹, Ю. А. Корнеев¹, В. И. Костенко¹, А. Н. Котик¹, Б. Б. Крейсман¹,
А. Ю. Кукушкин⁸, В. Ф. Кулишенко²⁵, Д. Купер¹¹, А. М. Кутькин¹, В. Х. Кэннон²⁶,
М. Г. Ларионов¹, М. М. Лисаков¹, Л. Н. Литвиненко²⁵, С. Ф. Лихачев¹, Л. Н. Лихачева¹,
А. П. Лобанов²³, С. В. Логвиненко¹, Г. Лэнгстон²⁷, К. Мак-Кракен¹¹, С. Ю. Медведев⁶,
М. В. Мелёхин², А. В. Мендеров², Д. В. Мерфи¹², Т. А. Мизякина¹, Ю. В. Мозговой²,
Н. Я. Николаев¹, Б. С. Новиков^{8,1}, И. Д. Новиков¹, В. В. Орешко¹, Ю. К. Павленко⁶,
И. Н. Пашенко¹, Ю. Н. Пономарев¹, М. В. Попов¹, А. Правин-Кумар⁴,
Р. А. Престон¹², В. Н. Пышнов¹, И. А. Рахимов¹⁸, В. М. Рожков²⁸, Дж. Д. Ромни²⁹,
П. Роша⁹, В. А. Рудаков¹, А. Рэйзенен³⁰, С. В. Сазанков¹, Б. А. Сахаров⁶,
С. К. Семенов², В. А. Серебренников², Р. Т. Скилицци³¹, Д. П. Скулачев⁸,
В. И. Слыш¹, А. И. Смирнов¹, Дж. Г. Смит¹², В. А. Согласнов¹, К. В. Соколовский^{1,19},
Л. Х. Сондаар⁵, В. А. Степаньянц²⁰, М. С. Турыгин³, С. Ю. Турыгин³, А. Г. Тучин²⁰,
С. Урпо³⁰, С. Д. Федорчук¹, А. М. Финкельштейн¹⁸, Э. Б. Фомалонт²², И. Фейеш³²,
А. Н. Фомина³³, Ю. Б. Хапин⁸, Г. С. Царевский¹, Дж. А. Цензус²³, А. А. Чуприков¹,
М. В. Шацкая¹, Н. Я. Шапировская¹, А. И. Шейхет², А. Е. Ширшаков²,
А. Шмидт²³, Л. А. Шнырева¹, В. В. Шпилевский¹⁸, Р. Д. Экерс¹¹, В. Е. Якимов¹

¹ Астрономический центр Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

² ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”, Химки Московской обл., Россия

³ Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, Москва, Россия

⁴ Гигантский радиотелескоп метровых волн (GMRT), Пуна, Индия

⁵ Нидерландский радиоастрономический институт “АСТРОН” (ASTRON), Двингелоо, Нидерланды

⁶ Закрытое акционерное общество “Время-Ч”, Нижний Новгород, Россия

⁷ Массачусетский технологический институт, Бостон, США

⁸ Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

⁹ Нёшательская обсерватория, Нёшатель, Швейцария

¹⁰ Закрытое акционерное общество “Салют-27”, Нижний Новгород, Россия

¹¹ Организация научных исследований Содружества (CSIRO), Сидней, Австралия

- ¹²Лаборатория реактивного движения (JPL), НАСА, Пасадена, США
- ¹³Объединенный европейский радиоинтерферометрический институт (JIVE), Двингелоо, Нидерланды
- ¹⁴Аэрокосмический факультет Делфтского технологического университета (LR TUD), Делфт, Нидерланды
- ¹⁵Отделение физики Болонского университета, Болонья, Италия
- ¹⁶Институт радиоастрономии, Болонья, Италия
- ¹⁷Организация километрового радиотелескопа SKA, Манчестер, Великобритания
- ¹⁸Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
- ¹⁹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
- ²⁰Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, Москва, Россия
- ²¹Компания “Илинен Компани”, Хельсинки, Финляндия
- ²²Национальная радиоастрономическая обсерватория (NRAO), Шарлоттсвилль, США
- ²³Институт радиоастрономии им. Макса Планка, Бонн, Германия
- ²⁴Московский энергетический институт, Москва, Россия
- ²⁵Институт радиоастрономии Национальной академии наук Украины, Харьков, Украина
- ²⁶Департамент физики и астрономии Йоркского университета, Торранто, Канада
- ²⁷Национальная радиоастрономическая обсерватория (NRAO), Грин Бэнк, США
- ²⁸Открытое акционерное общество “Ракетно-космические системы”, Москва, Россия
- ²⁹Национальная радиоастрономическая обсерватория (NRAO), Сокорро, США
- ³⁰Университет Аалто (бывший Хельсинкский университет технологии), Хельсинки, Финляндия
- ³¹Манчестерский университет, Манчестер, Великобритания
- ³²Обсерватория спутниковой геодезии (SGO) Института геодезии, картографии и дистанционного зондирования (FÖMI), Будапешт, Венгрия
- ³³Закрытое акционерное общество НПП “Радиосвязь”, Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 05.07.2012 г.; принята в печать 12.07.2012 г.

Российская академия наук и Федеральное космическое агентство при участии организаций многих стран подготовили и 18 июля 2011 г. осуществили запуск с космодрома “Байконур” орбитальной космической обсерватории “РадиоАстрон” с 10-м рефлекторным радиотелескопом на борту. Вместе с крупнейшими наземными радиотелескопами, станциями управления, сбора и обработки информации этот космический радиотелескоп образует многоантенную систему наземно-космического радиоинтерферометра со сверхдлинными базами, позволяющую впервые проводить исследования различных объектов Вселенной с угловым разрешением в миллионы раз лучше человеческого глаза. Проект рассчитан на систематические исследования компактных радиоизлучающих источников и их динамики. В числе исследуемых объектов — сверхмассивные черные дыры, аккреционные диски и релятивистские струи в ядрах галактик, черные дыры звездных масс, нейтронные звезды и гипотетические кварковые звезды, области образования звезд и планетных систем в нашей и других галактиках, межпланетная и межзвездная плазма, а также гравитационное поле Земли. Проведены наземные и летные испытания космического радиотелескопа в автономном режиме и в режиме наземно-космического интерферометра, о результатах которых сообщается в статье. Полученные характеристики согласуются с основными проектными требованиями. Начата научная программа астрофизических исследований.

DOI: 10.7868/S000462991303002X

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] был обоснован метод и предложена конкретная схема реализации сверхвысокого углового разрешения в радиоастрономии. Было

отмечено, что радиоинтерферометры на Земле и в космосе могут работать при очень больших базах между антеннами и с независимой регистрацией сигнала для каждой из них. Впервые такие интерферометры стали работать в 1967 г. в Канаде [4] и США [5]. Первые трансконтинентальные интерферометры были реализованы в 1968–1969 гг. между

* Для контактов E-mail: ykova@avunda.asc.rssi.ru

телескопами в США и Швеции [6], а также между антеннами дальней космической связи США и Австралии [7, 8]. Некоторые из первых наблюдений с трансконтинентальными радиоинтерферометрами были выполнены совместно радиоастрономами СССР и США в 1969 г. с использованием 43-м телескопа в Грин Бэнке (США) и 22-м телескопа в Симеизе (СССР) [9, 10]. В дальнейшем такие работы были проведены между всеми континентами. Современные трансконтинентальные радиоинтерферометры реализуют угловое разрешение вплоть до долей миллисекунды дуги. Эти наблюдения показали, что у большинства ядер активных галактик остаются неразрешенными компоненты даже с предельными для Земли проекциями базы на картинную плоскость (это примерно 10 000 км) — см., например, работы [11, 12] и ссылки в них.

Возможность создания космических интерферометров обсуждалась на научной сессии Отделения общей физики и астрономии Академии наук СССР 23 декабря 1970 г. [13]. Уже в те годы появились первые проекты интерферометров “Земля—Космос”. В 1970-е гг. Институт космических исследований АН СССР (ИКИ) совместно с промышленными организациями создали первый космический радиотелескоп с рефлектором диаметром 10 м. Телескоп представлял собой ферменную раскрывающуюся конструкцию с сетчатой отражающей поверхностью и приемниками, настроенными на диапазоны 12 и 72 см. Летом 1979 г. этот радиотелескоп был доставлен грузовым кораблем “Прогресс” на пилотируемую орбитальную станцию “Салют-6”, где с участием космонавтов В.А. Ляхова и В.В. Рюмина были проведены его испытания по астрономическим объектам [14, 15]. Одним из выводов этого эксперимента было решение использовать для антенны проекта “РадиоАстрон” жесткую отражающую поверхность.

В 1980 г. вышло Постановление Совета Министров СССР о разработке в НПО им. С.А. Лавочкина совместно с Академией наук шести космических аппаратов для астрофизических исследований. В их числе был и интерферометр дециметрового и сантиметрового диапазонов “РадиоАстрон” (проект “Спектр-Р”), а также миллиметровый и субмиллиметровый радиотелескоп “Миллиметр” (проект “Спектр-М”) [16]. При этом Техническое задание по проекту “РадиоАстрон” было подготовлено еще в 1979 г. Первое международное совещание по этому проекту состоялось в Москве 17–18 декабря 1985 г. Тогда были достигнуты договоренности о заключении соглашений и сформирована международная группа по разработке бортовых радиоастрономических приемников на основе отдельных Технических заданий. Эти Технические задания были разработаны и выпущены

в 1984–1985 гг. отделом астрофизики ИКИ АН СССР, возглавляемым И.С. Шкловским. В группу вошли специалисты из СССР, Нидерландов, ФРГ, Австралии, Финляндии и Индии. В начале 1990-х гг. бортовые экземпляры первых приемников на диапазоны 1.35, 6.2, 18 см и бортовые блоки входных малошумящих усилителей для приемника диапазона 92 см были поставлены в АКЦ ФИАН (образованный в 1990 г. из отдела астрофизики ИКИ и Радиоастрономической станции ФИАН в г. Пущино). Один из этих приемников — диапазона 18 см — и эти блоки усилителей диапазона 92 см и сегодня входят в состав комплекса научной аппаратуры космического телескопа “РадиоАстрон” в полете.

Первый успешный космический интерферометр был реализован в 1986–1988 гг. с использованием рефлекторной антенны диаметром 5 м геостационарного спутника дальней космической связи TDRSS (США), работавшей совместно с наземными радиотелескопами в диапазонах 2 и 13 см [17, 18]. В 1997 г. Японией был осуществлен запуск первого специально разработанного для интерферометрии космического радиотелескопа проекта VSOP на спутнике HALCA [19, 20]. Здесь антенна диаметром 8 м была установлена на спутнике, обращающемся вокруг Земли по эллиптической орбите с периодом 6.3 ч и максимальным удалением от центра Земли в 28 000 км. Этот космический радиотелескоп успешно функционировал на длинах волн 6 и 18 см до 2003 г. Оба космических интерферометра подтвердили не только возможность, но и необходимость дальнейшего развития наземно-космических радиоинтерферометров со сверхдлинными базами¹ (РСДБ) и повышения углового разрешения за счет увеличения размеров орбиты, а также расширения диапазона длин волн. Весь этот опыт был учтен при подготовке проекта “РадиоАстрон”.

Космический радиотелескоп “РадиоАстрон” представляет собой рефлекторную антенну диаметром 10 м, оснащенную комплексом приемной аппаратуры на длины волн 1.35, 6.2, 18 и 92 см. Для установки всего антенно-аппаратурного комплекса “РадиоАстрон” на космическом аппарате “Спектр-Р” используется базовая космическая платформа “Навигатор” [21–25]. Компонировка космического радиотелескопа (КРТ) и аппаратурного комплекса на модуле “Навигатор” показана на рис. 1².

¹ Мы используем в этой статье общеупотребимый термин “сверхдлинные базы” вместо правильного в русском языке “сверхбольшие базы”.

² Все упомянутые во Введении рисунки (рис. 1, 2, 4, 5, 7–10) обсуждаются далее подробнее в соответствующих разделах статьи. При этом рис. 4а–4м и рис. 7а–7ж помещены на цветных вклейках.

Общая блок-схема антенно-аппаратурного комплекса КРТ приведена на рис. 2. Высокоточные углепластовые панели главного зеркала КРТ были изготовлены и прошли испытания в России, а затем и в Научно-техническом центре Европейского космического агентства в 1994 г. (Нордвайк, Нидерланды; рис. 4а). Испытания модели космического радиотелескопа и аппаратурного комплекса интерферометра (рис. 4б) проводились с осени 2003 г. по лето 2004 г. в Пушинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН). В ходе этих испытаний были измерены основные параметры модели КРТ по астрономическим радиоисточникам и проведены тестовые наблюдения в режиме интерферометра, составляющими элементами которого служили КРТ и радиотелескоп РТ-22 ФИАН Пушинской радиоастрономической обсерватории. В дальнейшем РТ-22 ФИАН был оснащен дополнительным оборудованием, позволившем использовать его в качестве антенны наземной станции слежения за космическим аппаратом “Спектр-Р” в полете. Последние наземные испытания КРТ с модулем “Навигатор” проходили в НПО им. С.А. Лавочкина (рис. 4в, 4г). На самом радиотелескопе КРТ по предложению международного Фонда им. Грота Ребера была установлена памятная пластина (рис. 4д) с портретом пионера мировой радиоастрономии Грота Ребера (1911–2002). На обтекатель ракеты “Зенит-3Ф”, использовавшейся для запуска аппарата “Спектр-Р”, был помещен постер (рис. 4е) с изображением символов организаций и стран-участников проекта “РадиоАстрон”. На рис. 4ж–4и показан вызов ракеты-носителя с космическим аппаратом “Спектр-Р” и разгонным блоком “Фрегат” на стартовую позицию.

Старт ракеты “Зенит-3Ф” с космическим аппаратом “Спектр-Р” состоялся 18 июля 2011 г. в 5 ч 31 мин 17.91 с Московского декретного времени с 45-ой площадки космодрома “Байконур” (рис. 4к–4л). В тот же день в 14 : 25 разгонный блок и отделившийся от него космический аппарат были сфотографированы с помощью 45.5-см оптического телескопа в Нью-Мехико в США по запросу Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (рис. 5). Космический радиотелескоп был успешно раскрыт 23 июля 2011 г. (общий вид аппарата “Спектр-Р” в космосе условно показан на рис. 4м). После этого можно было начинать летные испытания, запланированные на первые полгода полета: проверку функционирования служебных систем и научной аппаратуры космического аппарата, измерение характеристик орбиты и ее корректировку, измерение основных параметров космического радиотелескопа, поиск лепестков наземно-космического интерферометра,

а также приступать к выполнению Ранней научной программы астрофизических исследований.

Краткая хроника ключевых астрономических наблюдений в первые полгода летных испытаний КРТ такова. В середине сентября 2011 г. были успешно выполнены первые включения радиоастрономических приемников, начались регулярные испытания бортовой научной аппаратуры, а с 27 сентября — радиометрические измерения параметров КРТ радиоастрономическими методами по наблюдениям различных астрономических объектов при работе КРТ в режиме одиночного радиотелескопа (рис. 7а, 7б, 8а–8в). Параллельно проводились наладка и испытания высокоинформативного радиоканала (ВИРК) для передачи данных между КРТ и наземной станцией слежения в Пушино в режиме интерферометра. Измерения в диапазонах 92, 18, 6.2 и 1.35 см начались наблюдениями остатка Сверхновой Кассиопеи-А (рис. 7а, 8а, 8б) и продолжились наблюдениями Юпитера, Луны, Крабовидной туманности (рис. 7б), сейфертовской галактики 3С 84 и квазаров 3С 273 и 3С 279, а также наблюдениями космических мазеров (рис. 9а–9в) и пульсаров (рис. 7е, 7ж, 10). 15 ноября 2011 г. с наблюдений квазара 0212+735 в диапазоне 18 см (рис. 7в) начались испытания радиоинтерферометра “Космос–Земля” в диапазонах 18, 6.2, 92 см, а затем и 1.35 см. Эти испытания проводились на различном удалении КРТ от Земли — от минимальных до предельных расстояний около 330 000 км — и по наблюдениям различных внегалактических и галактических объектов: квазаров и галактик, пульсаров и излучающих в узких спектральных радиолниях мазерных молекулярных источников (рис. 7в–7е).

Далее в статье описываются конструкция КРТ и конфигурация бортового научного комплекса (раздел 2), запуск, летные испытания КА “Спектр-Р” и наземный комплекс управления (раздел 3), параметры, средства измерения и точность восстановления орбиты, (раздел 4), измерение основных параметров КРТ по астрономическим источникам (раздел 5), проверка функционирования наземно-космического интерферометра (первые лепестки) и первые результаты наблюдений (раздел 6). В Заключении перечислены направления дальнейших исследований. В Приложении приведена возможная интерпретация антенных измерений в диапазоне 1.35 см.

2. КОНСТРУКЦИЯ КРТ И КОНФИГУРАЦИЯ БОРТОВОГО НАУЧНОГО КОМПЛЕКСА

Автоматический космический аппарат “Спектр-Р” предназначен для установки на нем космического радиотелескопа, используемого в качестве орбитального плеча наземно-космического

радиоинтерферометра со сверхдлинными базами (РСДБ). В его состав входят базовый служебный модуль “Навигатор” (головная организация – НПО им. С.А. Лавочкина) [21] и научный комплекс, состоящий из научной аппаратуры космического радиотелескопа международного проекта “РадиоАстрон” (головная организация – АКЦ ФИАН) и параболической антенны диаметром 10 м (совместная разработка НПО им. С.А. Лавочкина и АКЦ ФИАН) [22, 23]. Помимо этого, здесь же размещена научная аппаратура проекта “Плазма-Ф” (головная организация – Институт космических исследований РАН), предназначенная для исследований космической плазмы в пределах орбиты аппарата “Спектр-Р” (эта аппаратура и эксперимент описаны в публикациях [26, 27]).

2.1. Конструкция антенны

Конструкция антенны космического радиотелескопа разработана, исходя из необходимости размещения развертываемого 10-метрового рефлектора антенны в сложенном состоянии в отсеке ракеты под головным обтекателем с заданным внутренним диаметром 3.8 м, а также обеспечения необходимой точности отражающей поверхности после ее развертывания. Максимально допустимое отклонение (допуск) поверхности зеркала радиотелескопа от профиля идеального параболоида вращения во всех условиях эксплуатации, согласно техническому заданию, составляет ± 2 мм [28]. Отражающая поверхность формируется центральной частью зеркала диаметром 3 м и 27 радиальными лепестками-сегментами, синхронно раскрывающимися на орбите.

Общая схема компоновки КРТ на космическом аппарате “Спектр-Р” представлена на рис. 1. Основными несущими элементами зеркала являются:

- ферма фокального модуля (служит для регулировки положения облучателей);
- ферма рефлектора (обеспечивает крепление фокального модуля с фокальным контейнером);
- цилиндрическая проставка (предназначена для закрепления центрального зеркала и механизма раскрытия лепестков рефлектора, а также для размещения двух бортовых водородных стандартов частоты);
- переходная ферма между КРТ и служебным модулем “Навигатор” (используется для установки контейнера научной аппаратуры).

Для создания высокоточной отражающей поверхности лепестков предусмотрена наземная регулировка положения лепестков. Юстировка проводилась в два этапа. На первом этапе осуществлялась автономная юстировка каждого лепестка

юстировочными винтами по 45 точкам на специальном стенде с весовой разгрузкой, с учетом массы лепестка и положения оси поворота каждого из них. На втором этапе регулировалось положение лепестков после сборки рефлектора путем изменения длины подкосов, фиксирующих положение лепестков в раскрытом состоянии. Центральное зеркало закреплено на проставке при помощи девяти регулировочных опорных узлов. Измерения показали, что после наземных регулировок, при наличии люфтов и с учетом погрешностей изготовления и весовой разгрузки, максимальное отклонение поверхности рефлектора от теоретической для параболоида не превышало ± 1 мм.

Для надежного функционирования приборного комплекса и минимизации тепловых деформаций конструкции были разработаны системы обеспечения теплового режима (СОТР) лепестков, проставки, фокального и научного контейнеров, фокального узла и бортовых водородных стандартов частоты [29]. Холодная плита с размещенными на ней блоками малошумящих усилителей (МШУ) приемников в диапазонах 1.35, 6.2 и 18 см, соединенная с блоком антенных облучателей (БАО), установлена в фокальном узле КРТ, а радиатор СОТР холодной плиты размещен на фокальном контейнере с теневой стороны (рис. 1). СОТР холодной плиты предназначена для обеспечения требуемого теплового режима посадочных мест МШУ и центральной части БАО – поддержания температуры посадочных мест МШУ в интервале от 125 до 155 К и антенных облучателей (для диапазонов 1.35, 6.2 и 18 см) в интервале от 150 до 200 К в течение всего срока штатной эксплуатации КРТ. Геометрическая площадь затенения зеркала КРТ радиатором СОТР холодной плиты не превышает 1 м^2 . Максимальное тепловыделение МШУ на холодной плите – не более 0.3 Вт. Теплопритоки по тепловым связям с другими элементами конструкции КРТ – от 5 до 15 Вт (изменяются, главным образом, при изменении положения КРТ относительно Солнца). Между МШУ и БАО имеется тепловая связь по волноводам и кабелям. По данным телеметрии температурные режимы проставки, контейнеров, фокального узла и бортовых водородных стандартов частоты КРТ в полете соответствуют проектным требованиям.

2.2. Бортовой научный комплекс

Бортовой научный комплекс космического радиотелескопа создавался с 1985 г. в кооперации отечественных и зарубежных организаций в соответствии с общими техническими требованиями на разработку научной аппаратуры космического аппарата “Спектр-Р” и техническими заданиями на



Рис. 1. Компонновка космического радиотелескопа на базовом модуле “Навигатор”.

конкретные научные приборы, разработанными головной организацией по проекту “РадиоАстрон” — в то время отделом астрофизики ИКИ АН СССР, в 1990 г. преобразованного в АКЦ ФИАН. Космический аппарат разработан в НПО им. С.А. Лавочкина.

Первые бортовые приемники начали поступать в АКЦ ФИАН в начале 1990-х гг. В 2003–2004 гг. были проведены наземные радиоастрономические испытания КРТ в Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО АКЦ ФИАН, см. далее рис. 4б на цветной вклейке), а в 2009–2011 гг. — приемо-сдаточные испытания всего бортового комплекса научной и служебной аппаратуры космического радиотелескопа в составе с космическим аппаратом. Функциональная схема бортового комплекса научной аппаратуры приведена на рис. 2.

Научный комплекс состоит из следующих приборов и блоков, расположенных в соответствующих модулях, показанных на рис. 1 и 2.

1. В термостабилизированном охлаждаемом фокальном узле фокального модуля в открытом космосе находятся блок соосных антенных облучателей на радиоастрономические диапазоны 1.35, 6.2, 18 и 92 см для левой и правой круговых поляризаций, а также блоки маломощных усилителей (МШУ), вынесенные из приемников диапазонов 1.35, 6.2 и 18 см.

2. В охлаждаемом герметичном фокальном контейнере расположены научные приемники указанных выше четырех диапазонов (обозначены ПРМ на рис. 2; с отдельными источниками вторичного электропитания) для обеих поляризаций принимаемого радиоизлучения. МШУ диапазона 92 см находится внутри соответствующего приемника. Конструктивно приемник 92 см объединен с блоком

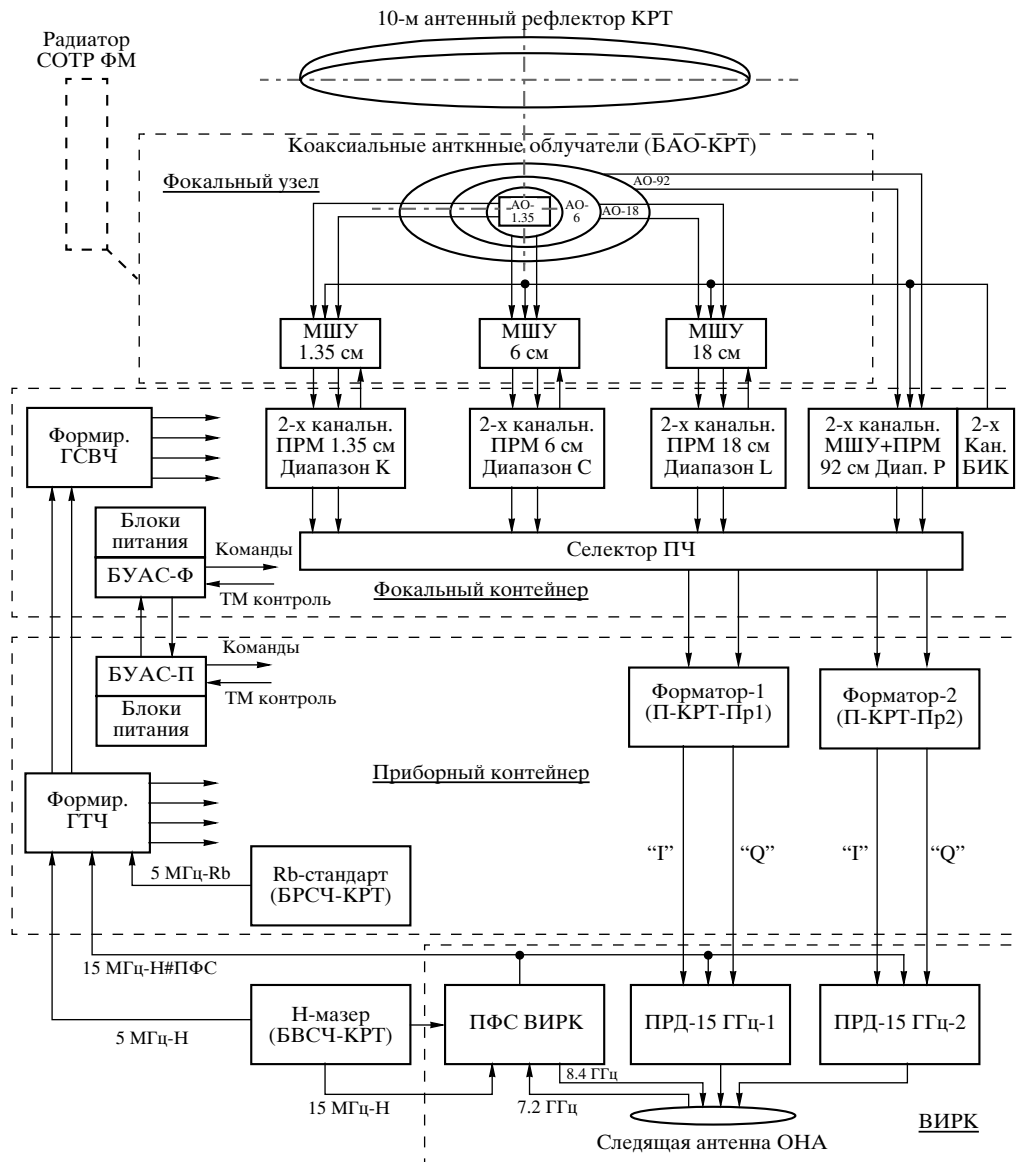


Рис. 2. Общая блок-схема КРТ. МШУ — блок малошумящего усилителя; СОТР ФМ — система обеспечения температурного режима фокального модуля; ПРМ — приемник радиоастрономический; БИК — блок импульсной фазовой калибровки; ПЧ — промежуточная частота; ТМ — телеметрия; Rb-стандарт — рубидиевые стандарты частоты; Н-мазер — водородный стандарт частоты (два экземпляра); Формир. ГТЧ — формирователь гетеродинных и тактовых частот; Формир. ГСВЧ — формирователь гетеродинных сверхвысоких частот; БУАС-Ф и БУАС-П — блок управления и анализа состояний фокального и приборного контейнеров, соответственно; ВИРК — высокоинформативный радиокомплекс; ПФС — петля фазовой связи; I, Q — потоки интерферометрических данных; ПРД 15 ГГц-1, 2 — передатчики астрономических данных на несущей частоте 15 ГГц; Следящая антенна ОНА — двухзеркальная остронаправленная антенна ВИРК диаметром 1.5 м.

импульсной фазовой калибровки для всех диапазонов. Выходные сигналы приемников на промежуточной частоте (ПЧ) поступают на селектор ПЧ, предназначенный для коммутации выходных ПЧ-сигналов приемников на соответствующие входы преобразователей частоты Форматора (он же блок П-КРТ-Пр) для дальнейших преобразований сигналов к более низким частотам. В фокальном кон-

тейнере размещен также частотный формирователь ГСВЧ, состоящий из двух блоков формирователя гетеродинных сверхвысоких частот (ФГСВЧ-1 и 2) со своими источниками вторичного электропитания (ИВЭП ФГСВЧ) и задублированный блок управления и анализа состояний (блок управления и контроля, БУАС-Ф) с блоком коммутации питания БКП-Ф (рис. 2).

3. В приборном модуле установлены два бортовых водородных стандарта частоты БВСЧ и приборный (научный) контейнер. В термостабилизированном герметичном научном контейнере размещены два бортовых рубидиевых стандарта частоты БРСЧ (Rb-стандарт на рис. 2), частотный формирователь ГТЧ со сдвоенным блоком формирователя гетеродинных и тактовых частот ФГТЧ и двумя источниками питания ИВЭП ФГТЧ для них, два аналого-цифровых преобразователя сигналов блока П-КРТ-Пр (Форматор) и задублированный блок управления и анализа состояний научного контейнера БУАС-П с блоками питания.

Спутник “Спектр-Р” с радиотелескопом на борту является уникальным научным аппаратом космического приборостроения. Весь комплекс бортовой аппаратуры аппарата и телескопа нацелен на решение одной задачи: многочастотный прием радиоизлучения очень слабых радиосигналов в диапазоне сантиметровых и дециметровых длин волн, находящихся глубоко под уровнем собственных шумов приемной системы, и многоступенчатое преобразование этих сигналов с предельно достижимыми фазовыми стабильностями к видеочастотам в полосе от нуля до 16 МГц, обеспечивающим высокоскоростную передачу и регистрацию бортовых данных на Земле. Для успешного решения этой задачи все приборы последовательной линии “бортовой приемник—преобразователь частот—бортовой передатчик—наземная станция приема” должны функционировать безупречно, так как потеря сигнала или фазовой стабильности хотя бы в одном из этих элементов (не говоря уже о выходе из строя) приведет к потере всей информации и очень дорогого наблюдательного времени для всех радиотелескопов, образующих многоантенный наземно-космический радиоинтерферометр. По этой причине в бортовой научный комплекс введены аппаратурное дублирование блоков и приборов и функциональная избыточность, что позволило компоновать эту последовательную линию из большого числа сочетаний приборов и блоков. Все это существенно повысило надежность работы комплекса в целом. Положительный эффект такого подхода сказался уже на этапе летных испытаний КРТ. Так, из двух установленных на борту и испытанных в полете водородных стандартов частоты только один оказался соответствующим проектным требованиям. Он непрерывно функционирует на орбите уже более года.

2.2.1. Блок антенных облучателей. Блок антенных облучателей (БАО) специальной конструкции установлен в фокусе зеркала антенны и состоит из четырех коаксиально расположенных облучателей (один внутри другого), в соответствии с длинами волн рабочих диапазонов. Облучатели

диапазонов длин волн 1.35, 6.2 и 18 см охлаждаются до температур около 150 К с помощью системы пассивного охлаждения (см. раздел 2.1). Эти облучатели соединяются с охлаждаемыми блоками маломощных усилителей через коаксиальные кабели (волноводы в диапазоне 1.35 см), которые обеспечивают также тепловой контакт облучателей с холодной плитой. Облучатель на диапазон 92 см не охлаждается, находится при температуре окружающей космической среды, и для уменьшения теплопритоков с него на охлаждаемые облучатели теплоизолирован от них. Облучатели в диапазонах 6.2, 18 и 92 см — резонансные, типа “бегущей волны”, с разделением сигналов на правую и левую круговые поляризации по коаксиальным выходам. Облучатель в диапазоне 1.35 см — открытый конец волновода с круглым раскрытием, с расщепителем и разделителем круговых поляризаций, переходящим в два прямоугольных волновода на выходе.

2.2.2. Комплекс приемников. Комплекс состоит из бортовых приемников, обеспечивающих прием сигналов в четырех диапазонах длин волн:

— диапазон Р с центральной частотой 324 МГц в полосе 16 МГц, приемник П-КРТ-92,

— диапазон L с центральной частотой 1664 МГц в полосе 6 МГц, приемник П-КРТ-18,

— диапазон С с центральной частотой 4832 МГц в полосе 110 МГц, приемник П-КРТ-6М,

— диапазон К с центральной частотой 22 232 МГц и еще семью поддиапазонами частот для многочастотного синтеза [30, 31] в интервале частот (18 372–25 112) МГц, приемник П-КРТ-1.35М.

Частоты восьми поддиапазонов с полосами 150 МГц диапазона К для многочастотного синтеза имеют следующие обозначения и значения центральных частот, отстоящих друг от друга на 960 МГц: F_{-4} — 18 392 МГц, F_{-3} — 19 352 МГц, F_{-2} — 20 312 МГц, F_{-1} — 21 272 МГц, F_0 — 22 232 МГц, F_1 — 23 192 МГц, F_2 — 24 152 МГц, F_3 — 25 112 МГц. Кроме них, сформированы еще четыре поддиапазона частот в диапазоне К — для спектральных наблюдений узких радиолиний — со следующими центральными частотами: 22 232 МГц, 22 200 МГц, 22 168 МГц и 22 136 МГц.

Все приемники предназначены для усиления, фильтрации и преобразования шумовых сигналов с непрерывным спектром указанных выше диапазонов в выходные сигналы на промежуточных частотах в интервале примерно от 405 до 555 МГц, а для сигналов узких радиолиний — в выходные сигналы на промежуточных частотах вблизи 400 МГц. Каждый приемник состоит из двух независимых идентичных каналов 1 и 2, на входы которых подаются сигналы в левой или правой круговой поляризации

из блока антенных облучателей, и конструктивно разделен на три отдельных блока: блок маломощных усилителей (МШУ), блок приемника и блок питания. Для резервирования блока питания каналов 1 и 2 могут подключаться как к “своему” каналу (1 или 2, внешней командой ПРЯМО), так и к другому каналу приемника (2 или 1, внешней командой КРЕСТ). В приемнике диапазона 1.35 см оба канала питаются от основного или резервного источников питания, выбираемого внешней командой. МШУ диапазонов L, C и K вынесены из приемников, расположены на холодной плите в фокальном узле радиотелескопа (рис. 1 и 2) и охлаждаются радиационным способом до температуры (40 ± 15) К. Все блоки приемников и блоки питания к ним размещены в герметичном термостатируемом фокальном контейнере при температуре от $+5^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$. МШУ диапазона Р находится в термостатируемом блоке приемника и имеет температуру $+30^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$. Приемники диапазонов Р, L и С построены по единому принципу с одиночным преобразованием частоты, а диапазона К — с двойным преобразованием частоты. Центральные частоты промежуточной частоты в диапазонах L и С имеют значение 512 МГц, а в диапазоне Р — 524 МГц. В тракте выходной промежуточной частоты всех каналов приемников имеется ступенчатый аттенуатор с введением затухания от 0 до 31 дБ для установки необходимого уровня выходного сигнала на промежуточной частоте при наземных испытаниях и наблюдениях в космосе.

Кроме выходного сигнала промежуточной частоты (ПЧ), который подается на прибор “Селектор ПЧ” и используется далее в режиме интерферометра, на выходе приемника по каждой из ортогональных поляризацій имеются два радиометрических сигнала амплитудой от нуля до 6 В, протектированных квадратичным детектором на промежуточной частоте: аналоговый (преобразуется в 8 бит телеметрической системой при передаче на Землю) и цифровой (12 бит). Полоса пропускания радиометрического тракта по уровню минус 3 дБ до детектора равна 16, 60, 110 и 150 МГц в диапазоне Р, L, С и К, соответственно, а время усреднения сигнала зависит от диапазона и составляет около 1 с. Полоса, выделяемая из выходного сигнала ПЧ приемника для использования в интерферометрическом режиме, формируется в Форматоре (см. ниже), зависит от диапазона и составляет от 16 до 32 МГц (две полосы, верхняя и нижняя, по 16 МГц).

В каждом поляризационном канале приемника имеется двухуровневый калибровочный генератор шума (ГШ) для амплитудной калибровки, сигнал от которого суммируется с внешним сигналом фазовой калибровки от блока импульсной фазовой калибровки, размещенного в приемнике диапазона

Р, и подается на вход блока МШУ, обеспечивая калибровку обоих каналов приемника одновременно. Величина высокого уровня генератора шума близка к шумовой температуре канала и используется при антенных измерениях. Низкий уровень ГШ (в 10 раз меньше высокого) выбирается для калибровки при наблюдениях слабых радиоисточников. Импульсный периодический сигнал для фазовой калибровки, частота повторения которого равна 1 МГц, используется при наблюдениях в интерферометрическом режиме. Для повышения стабильности усиления и стабильности уровня сигнала ГШ применяется система термостатирования. Отдельно термостабилизируются блоки приемников и ГШ внутри них, а также охлаждаются вынесенные в открытый космос блоки МШУ. Контроль их температур осуществляется через телеметрируемые параметры.

2.2.3. Бортовые стандарты частоты. Как известно, в радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами ключевое значение имеет стабильность частоты (фазы), определяемая, прежде всего, стандартом частоты, сигнал от которого используется в качестве первичного опорного сигнала для осуществления необходимых последовательных частотных преобразований. Функционирование космического радиотелескопа предусматривает работу с опорными сигналами от трех источников: 1) бортового водородного стандарта частоты БВСЧ (5 МГц или 15 МГц), 2) сигнала 15 МГц петли фазовой синхронизации ПФС ВИРК, синхронизированного сигналом наземного водородного стандарта частоты на Станции слежения, 3) бортового рубидиевого стандарта частоты БРСЧ (5 МГц).

В 1976 г. был запущен на ракете вертикально до высоты 10 000 км и успешно работал в течение двух часов полета водородный стандарт для измерения гравитационного потенциала и проверки предсказаний теории релятивистской гравитации в рамках эксперимента Gravity Probe A [32]. В 2008 г. Европейским космическим агентством [33] был осуществлен успешный запуск на орбиту Земли навигационного спутника GIOVE-B с тремя атомными часами на борту, использующими пассивный водородный стандарт частоты как первичный эталон и два рубидиевых стандарта как вторичные эталоны. БВСЧ КРТ является первым в мире бортовым *активным* водородным стандартом частоты на околоземной орбите и успешно участвующим в реализации орбитальной программы работ уже более года. Поэтому результаты его летных испытаний в составе космического радиотелескопа имеют особое значение — важное как для науки, так и для практики. При его создании в ЗАО “Время-Ч” были решены специальные задачи, не характерные для наземных стандартов, а именно:

— проблема вакуумирования термостатов за счет космического вакуума;

— усиления механической стойкости конструкции резонатора и накопительной колбы для жестких условий вывода приборов на космическую орбиту;

— проблема температурной стабилизации стандарта за счет использования системы обеспечения температурного режима основания прибора и теплоизоляции конструкции БВСЧ с помощью экранно-вакуумной теплоизоляции;

— проблема наземных испытаний в условиях отсутствия космического вакуума;

— ряд технологических проблем, связанных с эксплуатацией приборов в космическом вакууме.

Вместе с тем возникли новые проблемы, связанные с более высокими стабильностями бортового стандарта частоты и появлением новых дестабилизирующих факторов в космическом полете, — таких, например, как гравитационное и релятивистское смещения частоты стандарта при движении космического аппарата по орбите. Учитывая, что это первый опыт использования водородного стандарта в столь необычных условиях, можно ожидать появления и других, ранее не исследованных проблем.

2.2.4. Формирователи опорных частот. Формирование вторичных опорных частот осуществляется в блоках формирования гетеродинных и тактовых частот (БФГТЧ), а гетеродинных сверхвысоких частот — в блоках БФГСВЧ (рис. 2). БФГТЧ на основе первичных опорных сигналов на частотах 5 МГц или 15 МГц от бортового водородного стандарта частоты или 5 МГц от бортового рубидиевого стандарта частоты или 15 МГц от фазовой петли связи (о которой речь пойдет ниже) формирует вторичные опорные сигналы на частотах 64 и 160 МГц, сигналы тактовой частоты 72 МГц и синхрочастоты 40 кГц, необходимые для функционирования приборов научного комплекса. БФГСВЧ максимально приближен к потребителям его сигналов, является функциональным продолжением блока БФГТЧ и во многом повторяет его концепцию. Из вторичных опорных сигналов БФГТЧ в БФГСВЧ формируются гетеродинные сигналы для приемников диапазона 92 см (на частоте 200 МГц), 18 см (на частоте 1152 МГц), 6.2 см (на частоте 4320 МГц), а также опорные сигналы на частоте 8 МГц для формирования гетеродинов внутри приемника диапазона 1.35 см и для блока импульсной фазовой калибровки, размещенного в приемнике диапазона 92 см. Эта калибровка осуществляется для всех приемников на промежуточных частотах. Подробнее система формирования частот КРТ описана в [34].

2.2.5. Селектор промежуточных частот. Селектор ПЧ предназначен для подключения любых ПЧ-выходов приемников (4 выхода в левой и 4 выхода в правой поляризациях) на любые 2 входа основного или резервного блока Форматора (рис. 2), кроме сочетаний одноименных поляризаций разных диапазонов (левой с левой, правой с правой). Конфигурация задается ключами селектора, устанавливаемыми внешними командами. При одночастотной моде наблюдений к Форматору могут подключаться сигналы с одного или двух ПЧ-выходов приемников одного диапазона — в левой или/и правой поляризации. При этом сигнал с одного любого ПЧ-выхода может подключаться к двум входам Форматора параллельно, что важно при тестовых измерениях. При двухчастотной моде к Форматору подключаются два сигнала ПЧ с выходов приемников двух любых диапазонов, но при вышеуказанном ограничении на подключение одноименных поляризационных каналов.

2.2.6. Преобразователь П-КРТ-Пр (Форматор). Преобразователь П-КРТ-Пр (Форматор) обеспечивает:

— перенос спектра сигналов с выхода приемников из диапазона ПЧ в диапазон видеочастот и формирование верхних и нижних боковых полос видеоспектра от 0 до 16 МГц каждая (видеоконвертор SSB);

— преобразования для передачи видеоданных на Землю через бортовой передатчик высокоинформативного радиоканала ВИРК на частоте 15 ГГц.

Выделение верхних и нижних боковых полос видеоспектра осуществляется по схеме SSB преобразования с поворотами фазы сигналов на 90°, 180° и 270°, необходимыми для качественного формирования боковых полос. Видеосигналы преобразуются в цифровую форму, их цифровая фильтрация выполняется с помощью фильтров Баттерворта 7-го порядка. Использование цифровых фильтров обеспечило высокую повторяемость формы амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик. Предусмотрена возможность выбора ширины полосы фильтров, равной 4 МГц или 16 МГц.

Цепи преобразования сигналов для передачи на Землю включают в себя:

— однобитное (двухуровневое) клиппирование видеосигнала и перевод его в цифровую форму;

— параллельный синхронный опрос цифровых значений сигнала в верхних и нижних боковых полосах;

— преобразование параллельных субпоток данных в уплотненный последовательный высокоскоростной поток;

– формирование кадровой структуры высокоскоростного потока синхронизирующих последовательностей и ввод данных бортовой телеметрической системы в заголовки кадров;

– проведение дифференциального кодирования сигналов для выравнивания спектра фазомодулированного сигнала, передаваемого через канал ВИРК.

В результате опроса значений сигнала одной боковой полосы образуется поток данных со скоростью $16 \cdot 2 = 32$ Мбит/с при ширине видеополосы 16 МГц. Для передачи всего объема информации (4 видеополосы) последовательным потоком, с учетом введения 9-го бита четности для каждого переданного байта информации, символьная частота получается $32 \cdot 4 \cdot (9/8) = 144$ МГц при видеополосе шириной 16 МГц.

В преобразователе П-КРТ-Пр предусмотрено два конвертора ПЧ-сигналов. Снятая с них цифровая информация поступает в поток данных соответствующего конвертора на формирователь высокоскоростного потока. Отметим, что видеоданные передаются через канал ВИРК с помощью передатчика с квадратурной фазовой манипуляцией несущей частоты 15 ГГц. Это позволяет одновременно передавать два символа информации, что и использовано в данном приборе. Поэтому тактовая частота последовательного потока данных может быть понижена в 2 раза и окончательно составляет 72 МГц при видеополосе 16 МГц. Для улучшения энергетических параметров линии передачи видеоданных в приборе предусмотрена операция дифференциального кодирования. В результате на выходе прибора после кодирования получают два потока цифровой информации, но уже с данными, “перемешанными” из двух потоков от конверторов. Эти потоки обозначаются I и Q и поступают на модулятор передатчика ВИРК 15 ГГц.

Потоки I и Q разбиты на кадры, которые имеют длительность 2.5 мс для тактовой частоты 72 МГц и 10 мс для частоты 18 МГц. Внутри кадра информация передается байтами. Для каждых 8 бит создается 9-й бит четности, который передается в составе информационного потока. Биты жестко закреплены за источником информации, чтобы после ее приема на Земле их можно было идентифицировать и рассортировать по соответствующим группам (восстановить субпотоки бортового формирователя).

В служебных целях первые 30 байт кадра оформлены как заголовок кадра, включающий в себя синхропосылку из 7 байт (для точного определения момента 1-го бита 1-го байта кадра и дальнейшей корректной дешифрации бинарных данных), счетчик кадров (2 байта) от 1-го до 400-го

кадра и байты некоторой сопутствующей информации. Первые 10 байт заголовка отведены под передачу телеметрической информации от штатной бортовой телеметрической системы, что особенно важно в режиме наблюдений с выключенными передатчиками служебного радиоканала командно-измерительной информации (см. ниже). Выбор рабочей моды преобразователя осуществляется по командам, передаваемым в прибор по адресной шине, — управляющими кодовыми словами (УКС).

2.2.7. Блоки управления и анализа состояний. Управление бортовым комплексом научной аппаратуры производится, в основном, через приборы БУАС-П и БУАС-Ф с помощью импульсных функциональных команд (типа ФК) и команд УКС. В приборах БУАС цифровые команды УКС преобразуются в команды, аналогичные импульсным командам. Часть приборов (БВСЧ, П-КРТ-1.35 и П-КРТ-Пр) управляется непосредственно по адресной шине командами УКС.

Контроль функционирования приборов комплекса осуществляется через штатную бортовую телеметрическую систему космического аппарата. В эту систему непосредственно с приборов или через систему сбора БУАС поступают телеметрируемые сигналы в соответствии с требованиями к ним со стороны аппарата. При этом часть телеметрических данных формируется в виде информационно-цифровых массивов (например, таким образом телеметрируется часть данных от приемника диапазона 1.35 см и все данные от бортового водородного стандарта частоты).

В настоящее время бортовой комплекс научной аппаратуры обеспечивает полноценное функционирование КРТ практически во всех модах работы благодаря системе функционального и аппаратурного дублирования. При этом основное количество дублирующих приборов находится в запасе на непредвиденные ситуации.

2.3. Наземные испытания

В ходе подготовки к запуску автоматического космического аппарата “Спектр-Р”, в соответствии с требованиями к разработке научной аппаратуры космического назначения, в АКЦ ФИАН проводились различные испытания. На ранней стадии создания космического радиотелескопа целью таких испытаний было получение требуемых по техническим заданиям параметров отдельных приборов. А позднее, на стадии испытаний бортового комплекса научной аппаратуры и космического аппарата, — определение возможности их совместного функционирования в космическом полете.

С середины 1990-х гг., после поступления первых экземпляров приборов, в АКЦ проводились

испытания по их электрической стыковке и электромагнитной совместимости. В процессе испытаний разрабатывались и развивались программы и методики испытаний, определялась функциональная достаточность приборов и полнота комплектации научной аппаратуры. В 1999–2002 гг. были проведены три комплексных испытания по программам интерферометра с нулевой базой, в процессе которых были получены конкретные значения параметров интерферометра и проведено их сопоставление с расчетными значениями. В качестве второго плеча интерферометра использовались комплекты приемной аппаратуры, разработанной для наземных радиотелескопов. Ко второй половине 2002 г. весь радиоэлектронный комплекс в технологическом исполнении был готов для проведения радиоастрономических испытаний на специально созданном для этого полигоне в Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН.

2.3.1. Радиоастрономические испытания. В период 2002–2003 гг. на этом полигоне были проведены монтаж антенны КРТ на опорном устройстве и геодезическая юстировка поверхности зеркала, электрический монтаж комплекса научной аппаратуры и наземного оборудования, функциональные проверки всего комплекса и полигона, а с конца 2003 г. по середину 2004 г. были выполнены радиоастрономические испытания технологического экземпляра космического радиотелескопа по астрономическим источникам (см. далее рис. 4б на цветной вклейке).

В радиометрическом режиме были измерены флуктуационная чувствительность системы и эффективная площадь КРТ, ширина и форма главного лепестка диаграммы направленности, определены величины и положения первых боковых лепестков диаграммы направленности и уровня рассеяния вне пределов главного лепестка (в т.ч. с использованием наблюдений Луны) — см. далее табл. 2 в разделе 5. Была проведена юстировка фокального контейнера радиотелескопа для определения положения фокуса относительно расчетного значения и определена разница между положениями геометрической и электрической осей КРТ.

Наблюдения астрономических источников для испытания КРТ в радиоинтерферометрическом режиме были выполнены в диапазонах 6.2 и 1.35 см с использованием 22-метрового радиотелескопа Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН в качестве второго плеча интерферометра. На базе “КРТ–РТ-22” исследовалась также помеховая обстановка во всех рабочих диапазонах КРТ и возможность передачи опорных сигналов от водородного стандарта частоты. Были исследованы на электромагнитную совместимость приемник диапазона 1.35 см и передатчик ВИРК

15 ГГц и испытаны отдельные элементы Станции слежения — в частности, регистраторы S2 и РДР, а также Декодер АКЦ ФИАН-NRAO.

Несмотря на то, что впоследствии, по результатам этих испытаний, были приняты нелегкие решения о замене Форматора, блока антенных облучателей, декодера, о доработках приборов БУАС и РДР, главным результатом испытаний было то, что АКЦ ФИАН получил для дальнейших исследований работоспособный радиоэлектронный комплекс — полный комплект научной аппаратуры.

2.3.2. Испытания по программе интерферометра с нулевой базой. После завершения радиоастрономических испытаний КРТ был демонтирован, и весь технологический образец комплекса научной аппаратуры был отправлен в АКЦ для проведения дальнейших испытаний интерферометра с нулевой базой. Этот этап испытаний продолжался в течение 2005–2008 гг. Испытания проводились в диапазоне 6 см. Первой задачей испытаний интерферометра с нулевой базой стал вопрос практической проверки совместимости научных данных космического и наземных радиотелескопов. Эта задача была решена полностью. Второй задачей испытаний интерферометра с нулевой базой стало сопоставление параметров интерферометра, измеренных в результате корреляционной обработки, с их расчетными значениями. Результаты сравнения показали удовлетворительное совпадение и дали надежный экспериментальный материал для определения чувствительности радиоинтерферометра и необходимого когерентного времени накопления сигнала.

В середине 2008 г. в АКЦ ФИАН для испытаний интерферометра с нулевой базой поступил летный образец бортового комплекса научной аппаратуры. На этом образце были повторены испытания в диапазонах 6.2 и 1.35 см, но уже с новыми бортовыми приемниками П-КРТ-6М и П-КРТ-1.35М. Результаты испытаний показали не только хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений параметров, но и их стабильность, как во времени, так и от образца к образцу. По результатам испытаний, учитывая двухканальность бортовых приемников, было принято решение об упрощении испытаний в дальнейшем и сокращении их сроков за счет отказа от использования наземной приемной аппаратуры. В качестве ключевого параметра оценки качества работы бортового комплекса научной аппаратуры было решено использовать значение межканальной корреляционной функции (МКФ), получаемое в результате корреляционной обработки сигналов, прошедших через соответствующие парные каналы приемников. В дальнейшем, при проведении заводских испытаний различных рангов в НПО им. С.А. Лавочкина, параметр МКФ использовался как основной

для характеристики состояния бортового научного радиокомплекса.

На этом, фактически, были закончены радиотехнические испытания аппаратуры космического радиотелескопа в АКЦ, доказана пригодность используемой аппаратуры для проведения радиоинтерферометрических наблюдений и ее полная радиотехническая совместимость.

В начале 2009 г. летный образец бортового комплекса научной аппаратуры КРТ был отправлен в НПО им. С.А. Лавочкина на окончательную сборку и проведение заводских комплексных и приемосдаточных испытаний комплекса КРТ. В 2010–2011 гг. проведены сборка всего КРТ, заводские комплексные испытания, приемосдаточные испытания комплекса космического радиотелескопа. В апреле–июне 2011 г. комплекс был установлен на служебный модуль “Навигатор”, и успешно были завершены комплексные испытания автоматического космического аппарата “Спектр-Р”. Несмотря на то, что это уже были электрические испытания комплекса КРТ в интересах проверок совместного функционирования научной аппаратуры и служебного модуля в будущем космическом полете, для полноты результатов этих испытаний параметр МКФ постоянно контролировался. В начале июля 2011 г. состоялся вывоз ракетно-космического комплекса на стартовую позицию и 18 июля 2011 г. осуществлен успешный запуск автоматического космического аппарата “Спектр-Р”. В последующих разделах представлен материал по проведению летных испытаний КРТ и переходу к выполнению основной научной программы исследований.

2.4. Высокоинформативная радиолиния “КРТ–Земля”

В состав высокоинформативной радиолинии входят бортовой комплекс ВИРК и наземная станция слежения и сбора научной информации, созданная на базе радиотелескопа РТ-22 ФИАН Пущинской радиоастрономической обсерватории им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН (г. Пущино Московской области).

2.4.1. Бортовой комплекс ВИРК. Высокоинформативный радиоканал и бортовой комплекс ВИРК предназначен для передачи высокоскоростной видеоинформации от космического радиотелескопа на наземную станцию слежения и для синхронизации бортовой опорной частоты сигналом от наземного водородного стандарта в одном из режимов работы КРТ и ВИРК. Комплекс ВИРК может работать в одном из двух режимов: “КОГЕРЕНТ” или “Н-мазер”.

В режиме “КОГЕРЕНТ” с помощью комплекса ВИРК обеспечивается синхронизация бортового

опорного сигнала на частоте 15 МГц для системы формирования частот КРТ, а также сигналов передатчиков ВИРК на частотах 8.4 ГГц (мощностью 2 Вт) и 15 ГГц (мощностью 40 Вт) сигналом от наземной станции, который формируется на основе сигнала наземного водородного стандарта частоты и передается на борт с наземной станции слежения. При работе в режиме “Н-мазер” синхронизация сигналов передатчиков ВИРК осуществляется на частоте 15 МГц от бортового водородного стандарта частоты. Возможна работа комплекса ВИРК с пониженным уровнем излучения мощности передатчика (4 Вт) на частоте 15 ГГц.

В состав ВИРК входят антенно-фидерная система и бортовой радиотехнический комплекс. Антенно-фидерная система включает в себя:

- двухзеркальную приемопередающую остро-направленную антенну диаметром 1.5 м;
- вращающееся волновое сочленение, со-единенное с приводом этой антенны;
- волноводный тракт и фильтры.

Бортовой радиотехнический комплекс ВИРК содержит:

- приемопередатчик петли фазовой синхронизации на частоту 7.2/8.4 ГГц;
- радиопередающее устройство РПДУ-15 на частоту 15 ГГц.

2.4.2. Наземная станция слежения и сбора научной информации. Наземная станция слежения и сбора научной информации является частью высокоинформативной радиолинии “КРТ–Земля” в проекте “РадиоАстрон”. Структурная схема станции приведена на рис. 3. Станция предназначена для:

- 1) наведения наземного радиотелескопа РТ-22 ФИАН на КРТ и слежения за ним в течение сеанса связи;
- 2) приема и регистрации потока научных и служебных данных с борта космического аппарата;
- 3) передачи на борт аппарата фазостабильного опорного сигнала, синхронизированного наземным водородным стандартом частоты (“Н-мазером” станции слежения);
- 4) приема когерентно преобразованного на борту космического аппарата ответного сигнала, измерения текущей частоты остаточного доплеровского сдвига³ и текущей разности фаз ответного и запросного сигнала, регистрации этих измерений с привязкой к текущему времени;
- 5) приема внешних данных, необходимых для работы наземной станции, и выдачи потребителям

³ Под частотой остаточного доплеровского сдвига понимается разность измеренной частоты ответного сигнала и предсказанной частоты, учитывающей эффект Доплера.

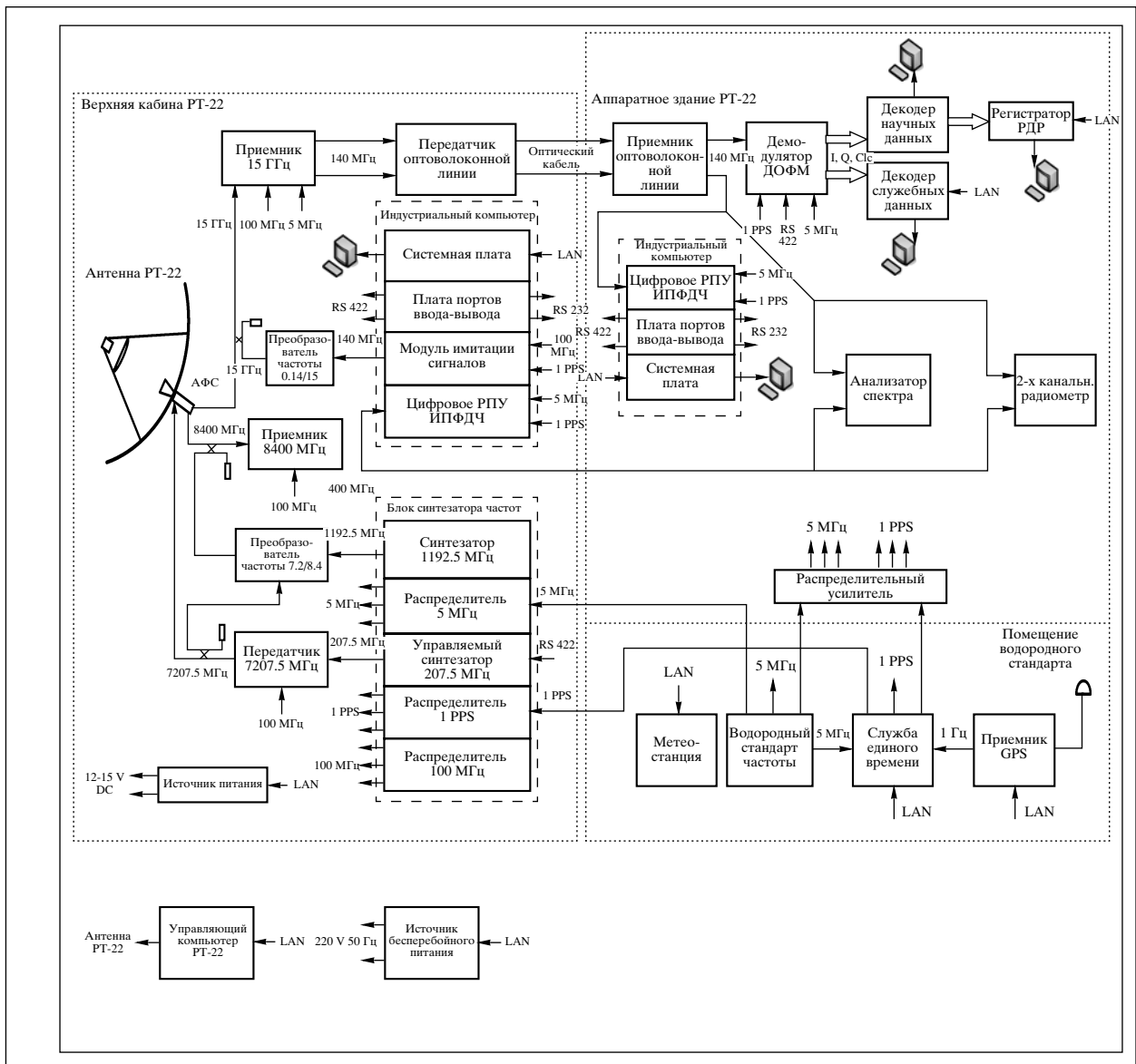


Рис. 3. Структурная схема наземной станции слежения в Пушчино.

информации о состоянии наземной станции слежения и сбора данных.

В состав наземной станции слежения входят:

- антенна радиотелескопа РТ-22 ФИАН, система наведения, облучатель и антенно-фидерные тракты на диапазоны частот 15, 8.4 и 7.2 ГГц;
- приемо-передающая система фазовой синхронизации в диапазонах частот 7.2/8.4 ГГц;
- система приема научных и служебных данных в диапазоне 15 ГГц;
- система измерения остаточного доплеровского сдвига и вариации фазы сигналов ВИРК;
- система регистрации научных и служебных данных;

– система опорных частот, служба времени и метеостанция;

– управляющий компьютер и программное обеспечение станции;

– аппаратура контроля работоспособности станции;

– аппаратура внешней связи и распределительная кабельная сеть.

Проведены измерения эффективной площади антенны РТ-22 с антенно-фидерной системой станции слежения и шумовой температуры приемной системы. Измеренная величина эффективной площади РТ-22 на частоте 15 ГГц составила

170 м². Шумовая температура приемной системы на частотах 8.4 и 15 ГГц составила около 100 К.

Аппаратура измерений доплеровского сдвига частоты. В процессе летных испытаний производилось тестирование работы входящих в состав наземной станции слежения измерителей доплеровского сдвига частоты. Эти измерения на станции проводятся на двух частотах нисходящих радиолоний 8.4 и 15 ГГц. Соответственно, на станции имеются два таких измерителя. Измеритель частоты 8.4 ГГц работает по тоновому сигналу, излучаемому бортовой аппаратурой петли фазовой синхронизации ВИРК, а измеритель частоты 15 ГГц — по фазо-модулированному сигналу (модулированному по методу “квадратурной фазовой манипуляции”), излучаемому передатчиком РСДБ-данных ВИРК. В процессе испытаний эти сигналы подавались на входы измерителя доплеровского сдвига частоты и параллельно отображались на экране анализатора спектра, с помощью которого производились независимые измерения частоты, отношения сигнала к шуму и других параметров входных сигналов. Измеритель доплеровского сдвига частоты 8.4 ГГц может работать в одном из трех режимов.

1) “Без управления” — при этом производятся измерения частоты сигнала нисходящей радиолонии, остаточного доплеровского сдвига и накопленной фазы; сигнал восходящей радиолонии от наземной станции слежения не передается; данные баллистического обеспечения используются только для получения остаточного доплеровского сдвига; используется в режиме работы ВИРК “Н-мазер”;

2) “По баллистике” — для управления частотой сигнала восходящей радиолонии используются данные баллистического файла (задержка и ее первая и вторая производные); при этом результаты измерений частоты сигнала нисходящей радиолонии, остаточного доплеровского сдвига и накопленной фазы только регистрируются; используется в сочетании с режимом работы ВИРК “Когерент-Б”;

3) “Автономно” — используется для самостоятельного управления частотой сигнала восходящей радиолонии на основе измерения частоты сигнала нисходящей радиолонии, остаточного доплеровского сдвига и накопленной фазы; данные баллистики используются только для получения первоначальной задержки; этот режим используется в сочетании с режимом работы ВИРК “Когерент-А”.

Измеритель на частоте 15 ГГц всегда работает только в режиме “Без управления”, производя измерения и регистрацию частоты сигнала нисходящей радиолонии, остаточного доплеровского сдвига и накопленной фазы. Для проверки работы измерителя частоты 8.4 ГГц использовалась прилагаемая к нему программа RefFreq, управляющая

работой измерителя. Аналогичные проверки проводились и для измерителя на 15 ГГц с помощью управляющей программы RefFreqFM. По результатам испытаний можно сделать вывод о полной работоспособности измерителей на 8.4 ГГц и 15 ГГц и их программного обеспечения во всех режимах работы.

Аппаратура приема научной видео- и телеметрической информации. В состав аппаратурной части входят приборы канала приема научной видеоинформации и приборы канала приема телеметрической (ТМ) информации. Аппаратура приема научной видеоинформации состоит из декодера научных данных и регистратора данных (РДР). Декодер научных данных предназначен для выделения полезного сигнала из потока данных, поступающих на декодер от демодулятора научной информации, промодулированной на борту специальным видом фазовой модуляции, а также для декодирования поступающих данных и их оперативного контроля. Регистратор данных осуществляет запись научных данных в рабочей моде. Начало каждой записи синхронизировано короткими импульсами с периодом 1 с на основе опорного сигнала частотой 5 МГц от водородного стандарта наземной станции слежения. Продолжительность записи 6–9 ч на наибольшей скорости записи. Управление регистратором осуществляется либо непосредственно, либо по каналу Ethernet с удаленным доступом. Регистратор данных в составе наземной станции комплектуется программным обеспечением для управления.

Аппаратура канала приема телеметрической информации состоит из декодера специальной телеметрической информации (10 байт в начале заголовка кадров) и выделенной линии передачи информации в Центр управления полетом (ЦУП) НПО им. С.А. Лавочкина со станции слежения в Пушино. Декодер ТМ-информации предназначен для выделения из заголовка каждого кадра ВИРК 10 байт с телеметрическими данными от штатной телеметрической системы космического аппарата, сохранения данной информации на жестком диске и/или непосредственной передачи телеметрических данных через Ethernet-порт в ЦУП и АКЦ ФИАН.

В ходе проведения сеансов научных и тестовых наблюдений обрабатывался прием, декодирование и передача данных телеметрии с борта космического аппарата в ЦУП. Во всех научных сеансах связи КРТ–Земля по каналу ВИРК на станции слежения в Пушино выполнялись измерения частоты и остаточного доплеровского сдвига на частотах 8.4 и 15 ГГц, данные этих измерений передавались на ftp-сервер Центра обработки научной информации АКЦ ФИАН для дальнейшей обработки и анализа.

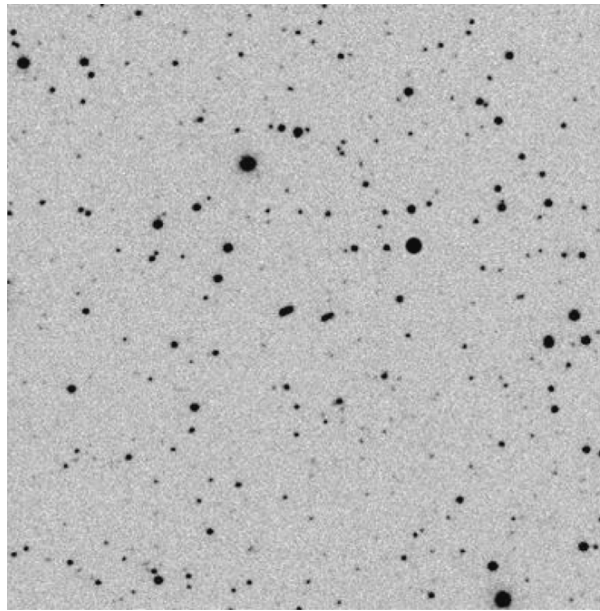


Рис. 5. Фотография разгонного блока “Фрегат” (справа) и отделившегося космического аппарата (слева) — см. две “черточки” в центре — в 14 : 25 мск, сделанная с помощью 45.5-см оптического телескопа в Нью-Мехико в США по заявке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Этот телескоп входит в астероидную подсистему НСОИ АФН и предназначен для поиска астероидов и комет.

Исследования высокоинформативной радиолинии, состоящей из комплекса ВИРК и станции слежения, были проведены в сеансах связи космического аппарата с наземной станцией слежения как в режиме работы КРТ в качестве одиночного радиотелескопа, так и в режиме работы КРТ с наземными радиотелескопами в составе многоантенного радиоинтерферометра. С целью повышения уровня принимаемого на Земле сигнала была отработана программа наведения бортовой антенны ВИРК на наземный радиотелескоп РТ-22 в Пушино. Проверено и скорректировано согласование поляризации бортовой антенны ВИРК и антенно-фидерной системы РТ-22 в Пушино в канале приема на частоте 15 ГГц, что привело к увеличению принимаемой мощности почти в 10 раз. Подтвержден высокий потенциал радиолинии, обеспечивающий устойчивую работу всего комплекса в Пушино на разных удалениях космического аппарата при его движении по орбите. При этом на относительно близких расстояниях (меньше 150–200 тыс. км) мощность излучения передатчика выбирается 4 Вт, а на больших расстояниях — 40 Вт. Отлажено взаимодействие наземной станции с Центром управления полетом в НПО им. С.А. Лавочкина, с баллистическим центром, с центром планирования научного эксперимента и с Центром обработки научной информации АКЦ ФИАН.

3. ЗАПУСК, ЛЕТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КА “СПЕКТР-Р” И НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ

Старт космического аппарата (КА) “Спектр-Р” проекта “РадиоАстрон” состоялся 18 июля 2011 г. в 05 : 31 : 17.91 по Московскому декретному времени с космодрома “Байконур”. КА с помощью ракеты-носителя “Зенит 2SB.80” и разгонного блока “Фрегат-СБ”, входящих в космический комплекс “Зенит 3Ф”, выведен на заданную орбиту и штатно реализовал циклограмму первого сеанса (рис. 4 (цветная вклейка), 5).

Схема выведения КА [21] на целевую орбиту (с параметрами: высота перигея $h_p = 577$ км, высота апогея $h_a = 336\,863$ км, наклонение орбиты $i = 51.6^\circ$) включала последовательные выходы на опорную ($h_p = 177$ км, $h_a = 447$ км, $i = 51.4^\circ$) и промежуточную орбиты ($h_p = 444$ км, $h_a = 3711$ км, $i = 51.5^\circ$). Управление КА “Спектр-Р” в полном объеме осуществляет Центр управления полетом (ЦУП) НПО им. С.А. Лавочкина.

КА “Спектр-Р” создан в НПО им. С.А. Лавочкина на базе космической платформы “Навигатор” [21, 24], успешно отработанной на КА “Электро-Л”, запущенном в начале 2011 г. Управление космическим комплексом “Спектр-Р” осуществляет главная оперативная группа управления (ГОГУ), созданная на базе НПО им. С.А. Лавочкина, с участием специалистов организаций-разработчиков бортовых систем и, в частности,

бортового комплекса научной аппаратуры, наземного сегмента управления и наземного научного комплекса. Принцип организации работы ГОГУ является традиционным для НПО им. С.А. Лавочкина. Группу управления и группу анализа составляют специалисты отдела логики и управления КА, участвовавшие в проектировании КА и его наземных испытаниях, а также в подготовке и испытаниях средств наземного сегмента управления КА. В составе служб группы анализа — специалисты ОКБ, курирующие соответствующие бортовые системы и прошедшие все этапы проектирования и испытаний своих бортовых систем. Специалисты НПО им. С.А. Лавочкина образуют также группу наземного сегмента управления, баллистическую группу, группы аппаратно-программных средств ЦУП, группу наземной станции НС-3.7, установленной в НПО им. С.А. Лавочкина. В составе главной оперативной группы управления функционируют также:

- оперативно-научная группа научного центра планирования АКЦ ФИАН,
- оперативно-научная группа ИКИ РАН по эксперименту “Плазма-Ф”,
- оперативно-техническая группа центра обработки научной информации,
- оперативно-техническая группа управления блоком преобразования информации.

Обработку результатов измерения параметров орбиты, реконструкцию и прогнозирование орбиты КА обеспечивает оперативно-техническая группа баллистического центра Института прикладной математики (ИПМ) РАН с участием специалистов НПО им. С.А. Лавочкина.

Работа главной оперативной группы управления началась задолго до старта КА и была посвящена подготовке аппаратно-программных средств ЦУП, программного обеспечения управления КА, эксплуатационной и организационно-технической документации, обучению персонала, проведению автономных и комплексных испытаний наземного сегмента управления, отладке взаимодействия средств ЦУП со станциями управления и наземным научным комплексом, проведению тренировок группы управления. Такой традиционный для НПО им. С.А. Лавочкина подход к формированию главной группы управления, организации подготовки персонала и аппаратно-программных средств позволил обеспечить готовность и надежное управление КА “Спектр-Р” с первых дней полета.

Особенность организации работы наземно-космического радиointерферометра “РадиоАстрон” заключается в необходимости согласованного взаимодействия космического телескопа, наземных радиотелескопов, наземных станций слежения, командно-измерительных станций управления КА,

центра управления полетом КА, центра планирования научных экспериментов, баллистического центра, центров обработки научной информации, включая средства связи и коммуникаций. На текущем этапе полета КА “Спектр-Р” основной задачей является выполнение программы научных наблюдений, реализуемых в ходе проведения научных сеансов. Типичный сеанс наблюдений продолжается, как правило, несколько часов, но случается, что его продолжительность составляет сутки и более. Сеанс представляет собой последовательность операций, обеспечивающих регистрацию излучения наблюдаемого источника, преобразование полученных сигналов в цифровой вид, передачу информации на наземную станцию слежения и сбора научной информации. Передача научных данных⁴ на наземную станцию слежения осуществляется через высокоинформативный радиоканал в Ки-диапазоне радиоволн (2 см) и управляемую от бортового комплекса управления бортовую остроуправленную антенну диаметром 1.5 м. При этом КА “Спектр-Р” позволяет обеспечить работу с несколькими наземными станциями слежения. В настоящее время, как отмечалось выше, работает наземная станция слежения и сбора научной информации, созданная на базе радиотелескопа РТ-22 диаметром 22 м в Пушинской радиоастрономической обсерватории АКЦ ФИАН.

Одновременно с космическим радиотелескопом исследуемый источник наблюдается сетью наземных радиотелескопов. Существует несколько десятков радиотелескопов, оборудование которых совместимо с КРТ КА “Спектр-Р” и которые могут участвовать в таких согласованных РСДБ-наблюдениях. Участие соответствующих обсерваторий определяется конкретной выполняемой научной задачей.

В управлении КА используются командно-измерительные наземные станции: “Кобальт-Р” в Медвежьих Озерах (Московская область) на базе антенного комплекса ТНА-1500 (МОКБ МЭИ) с антенной диаметром 64 м и “Клен-Д” (г. Уссурийск) на базе антенного комплекса П-2500 с антенной диаметром 70 м. Средняя продолжительность сеанса управления составляет около 4 ч.

⁴ К научным относится также большое количество телеметрических данных с приборов научного комплекса, в том числе низкочастотные сигналы радиометрических выходов астрономических приемников, которые собираются на борту штатной телеметрической системой в общий поток с данными от служебных систем и передаются на Землю по другому каналу — штатному радиоканалу командно-измерительной системы — через небольшие служебные антенны на борту и командно-измерительные наземные станции (см. ниже).

По решению группы управления передатчик бортовой командно-измерительной системы, как правило, не отключается по окончании сеанса для облегчения вхождения в связь в очередном сеансе. Однако этот передатчик отключается в интервалы времени, когда включены научные приемники КРТ, — в ходе испытаний и научных наблюдений. Включенный передатчик также позволяет контролировать телеметрическую информацию (ТМИ) космического аппарата на расстояниях до 120 тыс. км (в окрестности перигея), используя наземную станцию НС-3.7 с антенной диаметром 3.7 м НПО им. С.А. Лавочкина.

Типовая программа сеанса управления состоит из нескольких операций:

- контроль текущей телеметрической информации в режиме ее непосредственной передачи;
- закладка в бортовой комплекс управления полетных заданий для систем управления движением космического аппарата, управления антеннами и телеметрической системой (ТМС), закладка командно-программной информации (КПИ) баллистико-навигационного обеспечения (примерно один раз в пять суток), а также закладка отдельных кодовых команд прямого и отложенного во времени действия;
- контроль телеметрической информации воспроизведения запоминающего устройства и системы контроля электризации;
- контроль орбиты космического аппарата;
- разгрузка комплекса управляющих двигателей-маховиков (КУДМ);
- воспроизведение научной телеметрической информации от системы сбора научной информации (ССНИ) комплекса “Плазма-Ф”;
- закладка контрольно-программной информации управления научной аппаратурой комплекса “Плазма-Ф”;

В ходе сеанса управления на борт КА в виде группы полетных заданий закладывается рабочая программа, обеспечивающая выполнение в автономном режиме следующих задач типового цикла работ с КА “Спектр-Р”.

1. Проведение сеансов наблюдения источников, состоящих из отдельных операций:

- последовательные развороты КА в ориентацию, обеспечивающую наведение КРТ на исследуемый источник и наведение остронаправленной антенны ВИРК диаметром 1.5 м на наземную станцию слежения в Пушкино;
- включение требуемых режимов работы аппаратуры КРТ на время наблюдений;
- обратные развороты КА в исходную ориентацию.

2. Проведение радиоюстировки КРТ:

— операции, аналогичные задаче сеанса наблюдения, но с реализацией циклограммы последовательных переориентаций космического аппарата относительно направления на калибровочный радиисточник без наведения антенны ВИРК на станцию слежения в Пушкино (информация КРТ записывается на бортовое запоминающее устройство (ЗУ) и воспроизводится в очередном сеансе управления).

В случае, если по прогнозу температурного режима требуемая ориентация аппарата приведет к ухудшению температурного режима элементов конструкции комплекса ВИРК (балки, привода антенны, передатчика), предусматривается перевод антенны ВИРК на это время в положение, соответствующее положению Солнца в осях космического аппарата.

3. Проведение лазерной локации космического аппарата:

- операция переориентации аппарата на 1 ч в положение, обеспечивающее направление оси $-X$ космического аппарата на Землю (т.е. КРТ направляется в противоположном от Земли направлении);
- обеспечение ориентации КА, требуемой для прибора МЭП из состава комплекса “Плазма-Ф”, при которой Солнце находится под углом 100° к оси $+X$ длительностью до 6 ч с переводом антенны ВИРК в заданное положение.

Последовательность операций в задачах наблюдения источников, радиоюстировок и лазерной локации определяется Научной месячной программой работ, формируемой оперативной научной группой КРТ (АКЦ ФИАН). Эта программа работ учитывает научные задачи, текущие баллистические параметры орбиты, текущие ограничения на задействование наземных радиотелескопов и ограничения по длительности режимов наблюдений в определенных ориентациях космического аппарата, зависящих от положения Солнца в осях аппарата и положения антенны ВИРК. Аппаратно-программными средствами ЦУП научная месячная программа работы проходит проверку на реализуемость, с точки зрения учета всех ограничений, в баллистической группе анализа полета и в группе систем обеспечения теплового режима (СОТР).

В группе СОТР накоплен большой статистический материал, позволяющий с требуемой точностью прогнозировать изменение температурного поля в критических элементах конструкции КА в зависимости от положения Солнца и антенны ВИРК. Ведется работа над автоматизацией необходимых расчетов для повышения оперативности и надежности прогноза, а также для обеспечения возможности оценки прогноза специалистами АКЦ на этапе формирования научной месячной

программы работы. В работе группы СОТР используется специально разработанная трехмерная модель космического аппарата, обеспечивающая визуализацию освещенности элементов конструкции аппарата при различных положениях Солнца и антенны ВИРК.

На основе научной месячной программы работ группа управления НПО им. С.А. Лавочкина разрабатывает программу работы КА “Спектр-Р” на месяц. В соответствии с заявкой, по предпочтительным участкам специальной ориентации КА для обеспечения оптимальных условий работы прибора МЭП, в программу включаются дополнительные операции переориентации космического аппарата. Программа работы КА “Спектр-Р” утверждается оперативным техническим руководством главной оперативной группы управления и становится основным документом, обеспечивающим координацию оперативной работы всех элементов КА “Спектр-Р”. Программа содержит план проведения сеансов на очередной месяц, план всех основных операций с КА, план работы станций управления, станций слежения, наземных радиотелескопов, станций лазерной локации. Задействование станций управления осуществляет группа наземного сегмента управления в НПО им. С.А. Лавочкина, а станции в Пущино и наземных радиотелескопов – оперативная научная группа КРТ в АКЦ ФИАН, станций лазерной локации – группа баллистического и навигационного обеспечения в ИПМ РАН.

За сутки до проведения очередного сеанса группа управления в соответствии с месячной программой работы КА “Спектр-Р” и на основе типовых программ разрабатывает Программу сеанса управления. Данные по навигации КА и антенны ВИРК рассчитываются группой по баллистическому анализу аппаратно-программных средств управления ЦУП. Формирование полетных заданий управления научной аппаратурой комплекса КРТ и комплекса “Плазма-Ф” производится автоматически на основе командно-программной информации, подготовленной оперативными научными группами КРТ и “Плазма-Ф”, соответственно. Программа сеанса формируется в виде управляющего файла, содержащего командно-программную информацию на управление космическим аппаратом и команды управления на наземные командно-измерительные станции. Проверка корректности составленной программы осуществляется с использованием информационно-логического стенда бортового комплекса управления, построенного на основе модели этого комплекса, полностью соответствующей в своей программной части реальному бортовому комплексу космического аппарата “Спектр-Р”. Моделирование осуществляется последовательными интервалами времени: от начала

тестируемого сеанса до начала следующего планируемого сеанса, на 1–2 сут полета.

Реализация программы служебного сеанса связи проходит в автоматическом режиме с получением от космического аппарата и от командно-измерительных станций управления аппаратом подтверждающей контрольной информации. В ходе сеанса поступающая с этих станций телеметрия от аппарата обрабатывается на средствах ЦУП НПО им. С.А. Лавочкина, анализируется специалистами группы анализа и передается в центры обработки научной информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН и ИКИ РАН. Результаты измерений параметров орбиты КА поступают от командно-измерительных станций в ЦУП НПО им. Лавочкина и далее в ИПМ РАН.

По мере выполнения задач программы летных испытаний бортовых систем КА число привлекаемых к оперативной работе специалистов группы анализа уменьшается. К настоящему времени только специалисты группы комплексного анализа, службы бортового комплекса управления и службы систем обеспечения температурного режима постоянно участвуют в оперативном контроле телеметрической информации КА. В анализе телеметрии используется программа автоматизированного контроля важных параметров КА на соответствие допускам и на соответствие спрогнозированным значениям, полученным при моделировании сеанса на стенде бортового комплекса управления. Службы бортовых систем имеют возможность контролировать телеметрическую информацию вне ЦУПа на своих рабочих местах. Специалисты оперативных научных групп КРТ и “Плазма-Ф”, получая служебную телеметрию из ЦУПа в реальное время, контролируют функционирование комплекса научной аппаратуры, находясь в АКЦ ФИАН и ИКИ РАН, соответственно. При необходимости, в случае замечаний к работе комплекса в ходе сеанса управления, эти группы выдают в группу управления НПО им. С.А. Лавочкина заявки на оперативную выдачу дополнительной командно-программной информации в адрес комплекса научной аппаратуры.

До начала проведения всего цикла испытаний с КА была создана, испытана и полностью подготовлена к работе наземная станция слежения и сбора научной информации на базе радиотелескопа РТ-22 в Пущино. Информация, получаемая наземной станцией слежения в ходе сеансов интерферометрических наблюдений, также учитывается для контроля состояния КА. Для этого с наземной станции в Пущино, принимающей через канал ВИРК поток научной информации, в ЦУП передается выделенная из заголовков научных кадров служебная телеметрическая информация. Эта информация обрабатывается и используется так

Таблица 1. Параметры орбиты космического радиотелескопа “РадиоАстрон” по состоянию на 14 апреля 2012 г. (32 витка после запуска)

Большая полуось	$a = 174714.234$ км
Эксцентриситет	$e = 0.692$
Наклонение орбиты	$i = 79.69^\circ$
Долгота восходящего узла	$W = 300.55^\circ$
Аргумент перигея	$w = 303^\circ$
Время прохождения перигея	07:12:37.00 UTC 14 апреля 2012 г.
Период орбиты	≈ 8.5 сут

же, как и телеметрическая информация, передаваемая по другому каналу (телеметрическому): через малые бортовые антенны в сеансах связи с командно-измерительными наземными станциями, после наблюдений.

Описанная выше организация управления космическим аппаратом “Спектр-Р” и коллектив главной оперативной группы управления обеспечили оперативное и надежное управление комплексом “Спектр-Р” — “РадиоАстрон”, в том числе на первом, наиболее напряженном этапе полета аппарата, когда выполнялись первые серии испытаний. Более подробно летные испытания КА и организация управления космическим аппаратом “Спектр-Р” описаны в [26].

4. ОРБИТА: ПАРАМЕТРЫ, СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

После запуска большая полуось орбиты аппарата составляла 173.4 тыс. км, высота перигея — 578 км, высота апогея — 333.5 тыс. км, а период обращения — 8.32 сут. С этой орбиты были выполнены первоначальные наблюдения. Через несколько месяцев после выведения КА на рабочую орбиту выяснилось, что из-за низкого перигея аппарат может прекратить свое существование уже в конце 2013 г. Чтобы избежать снижения перигея орбиты, двумя включениями системы корректирующих двигателей была осуществлена коррекция орбиты. После коррекции (1 марта 2012 г.) орбита имеет расчетное время баллистического существования больше 9 лет, причем интервалы нахождения КА в тени Земли будут не более 2 ч. Параметры элементов орбиты после коррекции (на 14 апреля 2012 г.) приведены в табл. 1.

Под воздействием возмущений от Луны и Солнца орбита претерпевает эволюцию. Величина эксцентриситета в течение полета изменяется от 0.96 до 0.59, наклонение орбиты будет меняться в пределах от 10° до 85° . На рис. 6а показана эволюция радиуса перигея и радиуса апогея после коррекции. Радиус перигея изменяется от 7000 км до 81.5 тыс. км, а радиус апогея от 280.0 до 353.0 тыс. км. Дальнейшие наблюдения за движением аппарата показали, что коррекция прошла штатно и оценка фактических параметров коррекции близка к расчетным значениям. На рисунках 6б–6д показана расчетная эволюция проекции орбиты на небесную сферу в 2013–2015 гг. На рис. 6е–6л для примера показано соответствующее этой эволюции орбиты заполнение (u, v) -плоскости пространственных частот при синтезировании изображений в К-диапазоне с использованием двух крайних поддиапазонов (1.19 и 1.63 см) за год в 2013, 2014 и 2015 гг. для радиогалактик М87 (рис. 6е–6з) и Центавр-А (рис. 6и–6л). Для обоих источников видна существенная эллиптичность охватываемой наблюдениями области. Поэтому в дальнейшем, возможно, будет произведена дополнительная коррекция орбиты с целью реализации одинакового разрешения по всем направлениям на (u, v) -плоскости. Более подробную информацию о новых возможностях можно найти в [35], а об эволюции орбиты в ближайшие 5 лет — на сайте проекта [25].

Для работы интерферометра необходимо с максимальной высокой точностью определять положение базы наземно-космического интерферометра. С точки зрения навигационного обеспечения КА “Спектр-Р” является сложным аппаратом. Одним из факторов воздействия на баллистику КА является солнечное световое давление. В ходе полета давление солнечной радиации по-разному действует на элементы поверхности КА, что приводит к существенному возмущению орбиты. Помимо непосредственного возмущения движения центра масс, сильно зависящего от текущей ориентации аппарата, световое давление создает момент сил относительно центра масс. Заданная ориентация аппарата удерживается системой маховиков. Длительное воздействие возмущающих моментов одного направления приводит к постоянному увеличению угловой скорости маховиков, что, в свою очередь, вызывает необходимость их разгрузки — уменьшения угловой скорости вращения путем включения реактивных двигателей системы стабилизации. При этом возникает возмущение движения центра масс КА. Приращение скорости, вызванное такими возмущениями, составляет 5–10 мм/с за одну разгрузку. Накопленное из-за этого в течение суток дополнительное смещение положения КА может составлять 400–800 м по дальности, что

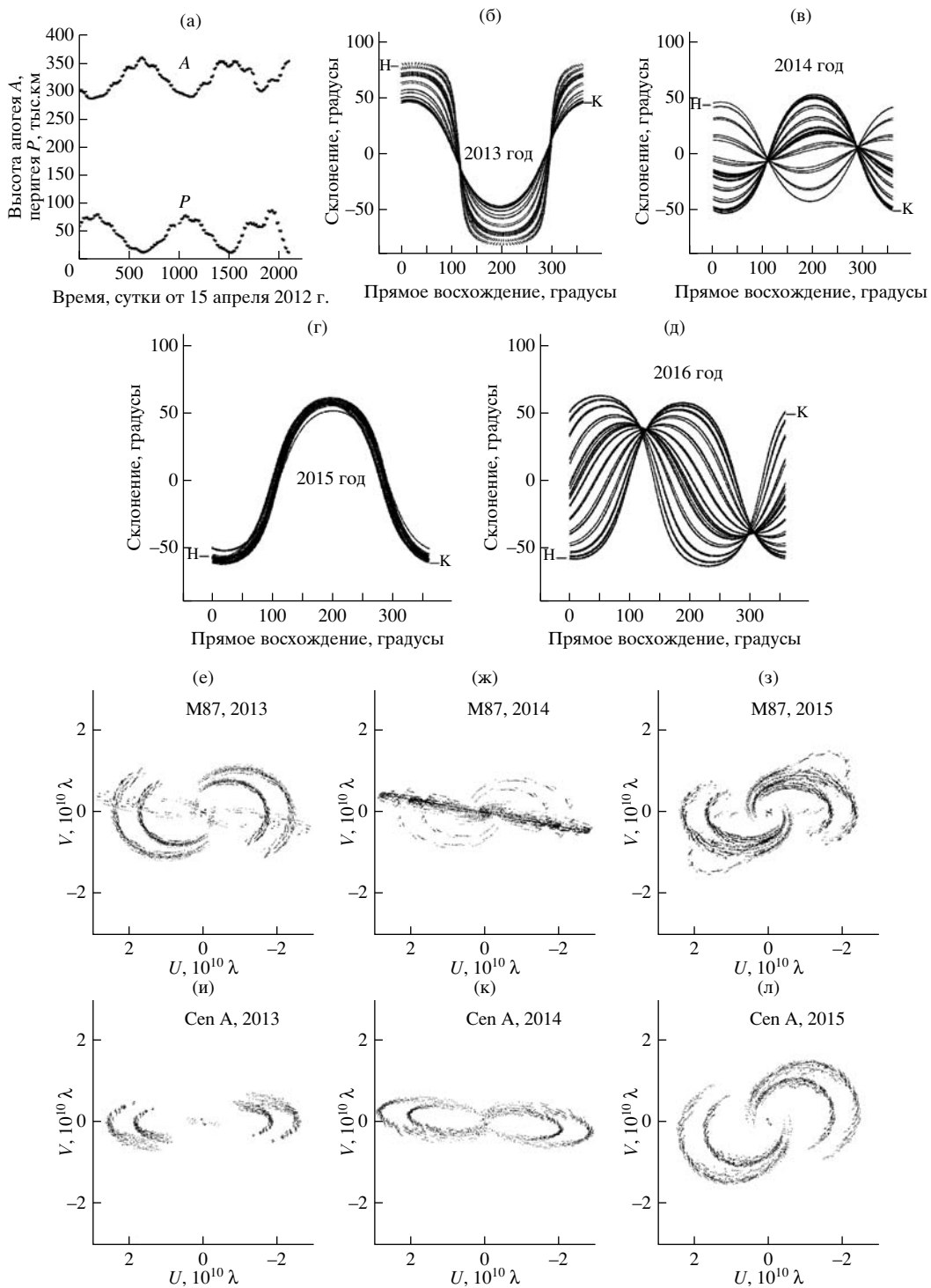


Рис. 6. Расчетная эволюция орбиты КРТ со временем (а–д) и примеры заполнения (u, v) -плоскости пространственных частот при синтезировании изображений в двух крайних поддиапазонах F_3 (длина волны 1.19 см) и F_{-4} (длина волны 1.63 см) диапазона 1.35 см (е–л): высота перигея P и высота апогея A (а), покрытие небесной сферы возможными наблюдениями с интерферометром “Земля – КРТ” в течение 2013 г. (б), 2014 г. (в), 2015 г. (г) и 2016 г. (д) (буквами “H” и “K” обозначены начальная и конечная орбиты года); заполнение (u, v) -плоскости в 2013 г. (е), 2014 г. (ж) и 2015 г. (з) в сеансах девятиантенных наблюдений галактики M87 с участием КРТ и наземных радиотелескопов в Грин Бэнк и Голдстоун (США), Эффельсберге (Германия), Джодрелл Бэнк (Англия), Евпатории (Украина), Парксе и Тидбинбилла (Австралия), Робледо (Испания); позиционный угол струи в M87 равен -77° ; (и–л) – то же, что на графиках (е–з), но для галактики Центавр-А (позиционный угол струи равен 51°). Синтезирование широкой полосы частот с помощью 8 поддиапазонов от 1.63 до 1.19 см приводит к соответствующему заполнению (u, v) -треками области между треками, показанными для этих крайних длин волн.

превышает точность радиотехнических измерений дальности. Подобные возмущения существенно затрудняют определение орбиты КА.

Для определения орбиты используется модель движения, учитывающая ряд возмущающих факторов. Учитываемые возмущения включают в себя:

- нецентральность гравитационного поля Земли, рассчитываемую в соответствии с моделью EGM-96 [36];

- притяжение Луны и Солнца, координаты которых вычисляются на основе теории движения DE421 [37];

- давление солнечного света;

- возмущающие ускорения, возникающие в процессе разгрузки маховиков;

- “твердые приливы”, т.е. поправки к гравитационному полю Земли, обусловленные ее деформацией под действием гравитации Луны и Солнца [38].

Переменное давление солнечного света оказывает существенное влияние на движение КА. Из-за наличия 10-м антенны КРТ отношение миделя к массе аппарата заметно выше, чем у других спутников и, к тому же, сильно зависит от ориентации. Для учета возмущения в модели используется приближенная форма аппарата, которая состоит из трех основных компонент, формирующих его поверхность: антенны КРТ, центрального блока и панелей солнечных батарей.

Для аппарата “Спектр-Р” измерения орбиты космического аппарата и скорости его движения проводятся различными методами. Они включают, в частности, штатные радиотехнические измерения дальности и радиальной скорости, которые регулярно осуществляются станциями управления в Усурийске и Медвежьих Озерах. Измерения радиальной скорости по сигналу ВИРК проводятся на наземной станции слежения в Пушинской радиоастрономической обсерватории. Сюда же следует отнести лазерные измерения дальности и оптические астрометрические измерения положения аппарата. Еще один метод — это РСДБ-измерения вектора состояния аппарата по сигналу на 8.4 ГГц от ВИРК по методике PRIDE [39]. Такие измерения по сигналу ВИРК сопутствуют научным экспериментам. Сигнал формируется при помощи водородного стандарта частоты, установленного на борту аппарата. По измеряемому сдвигу частоты с учетом релятивистских поправок [40] с высокой точностью определяется радиальная скорость аппарата.

Лазерные измерения дальности являются одними из наиболее точных и информативных среди всех перечисленных источников орбитальной информации. Однако для их получения необходимо выполнение ряда условий. Поскольку угловые

отражатели установлены только на днище аппарата в направлении $-X$, проведение лазерной локации требует определенной ориентации КА, которая не всегда может быть обеспечена. Кроме погодных условий и времени суток, еще одним существенным фактором, ограничивающим возможность проведения лазерных измерений, является предел по дальности. Большинство имеющихся станций лазерной локации рассчитано на работу с низколетящими аппаратами и не способно зафиксировать отраженный сигнал от КА, находящихся выше геостационарной орбиты. “Спектр-Р” является первым высокоапогейным искусственным спутником Земли с установленными уголковыми отражателями, удаляющимся на расстояния, сопоставимые с лунными. Пока такие измерения проводятся на двух станциях: обсерваторией Grasse (Лазурный Берег, Франция) и лазерным оптическим локатором контроля космического пространства (ЛОЛ ККП) на Северном Кавказе. Сложности, связанные с проведением лазерной дальнометрии, ограниченность числа станций, способных работать с таким объектом, и сильная зависимость от погодных условий не позволяют получать данные этих измерений и использовать их при уточнении орбиты на регулярной основе. Другое важное применение лазерных измерений — калибровка штатных радиотехнических систем.

Астрометрические наблюдения (оптические измерения положения аппарата относительно звезд) проводятся обсерваториями Научной сети оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений (НСОИ АФН) [41], а также отдельными наблюдателями, пересылающими измерения в Центр малых планет [42]. Было получено более 400 проводок аппарата, содержащих 13 300 измерений. Несмотря на то, что такие измерения не могут обеспечить необходимую точность определения всех параметров, они дают независимые от радиальных характеристик данные, определяющие положение плоскости орбиты, тем самым полезно дополняя измерения дальности и радиальной скорости.

Использование описанной модели позволяет реконструировать орбиту для обработки данных в корреляторе с точностями для положения не хуже ± 500 м и для скорости не хуже ± 2 см/с по трем координатам. Важно заметить, что эти числа отражают не среднеквадратичные значения случайной ошибки, а гарантированную оценку остаточной медленно меняющейся разности между реальной и восстановленной орбитами.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРТ ПО АСТРОНОМИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКАМ

5.1. Приемники и чувствительность космического радиотелескопа

Описание космического аппарата “Спектр-Р”, на котором установлен радиотелескоп проекта “РадиоАстрон”, и космического радиотелескопа с бортовым комплексом научной аппаратуры, а также наземного сегмента наземно-космического радиоинтерферометра даны в предыдущих разделах и статьях [21–23]. Суммируем сказанное, выделив элементы, которыми определяются чувствительность КРТ в автономных антенных измерениях и чувствительность интерферометра при измерениях в системе “КРТ–наземный телескоп”.

Положение радиотелескопа относительно космического аппарата жестко фиксировано. Наведение КРТ на объект и сканирование осуществляются движениями аппарата с помощью исполнительных органов системы управления ориентацией КА (без включения реактивных двигателей). Ориентация в пространстве контролируется по звездным датчикам. Радиоизлучение астрономического источника, собираемое 10-м параболическим зеркалом, через блок антенных облучателей поступает на входы всех радиоастрономических приемников одновременно. После частотных преобразований входного сигнала в приемнике и следующих за ним научных приборах выходные низкочастотные и высокочастотные данные двумя потоками по двум радиоканалам передаются на Землю, архивируются и обрабатываются. Чувствительность, в основном, определяется эффективной площадью антенны и эквивалентной шумовой температурой КРТ, равной сумме вкладов от приемника, антенно-фидерного тракта телескопа и фона неба.

Приемная система радиотелескопа состоит из 8 приемников на 4 диапазона: 1.35, 6.2, 18 и 92 см, по два приемника на диапазон — для левой и правой круговой поляризации излучения. На входы каждой такой пары приемников поступают сигналы от формирователей круговых поляризаций соответствующего диапазона, которые конструктивно объединены с облучателями антенны в общий четырехдиапазонный соосный блок антенных облучателей (БАО).

Облучатель в диапазоне 1.35 см представляет собой круглый волновод, переходящий в волноводный формирователь-разделитель круговых поляризаций с двумя прямоугольными волноводами на выходе. Облучатели в остальных диапазонах — кольцевые щелевые, радиус колец которых увеличивается с ростом длины волны. Кольцевые щели облучателей соосны друг с другом и с круглым

волноводом. Формирователи-разделители поляризаций в диапазонах 6.2, 18 и 92 см — полосковые с коаксиальными выходами. Восемь выходов формирователей поляризаций БАО соединены с блоками входных малошумящих усилителей (МШУ) приемников соответствующих диапазонов отрезками линий — волноводных в диапазоне 1.35 см и коаксиальных в остальных диапазонах. Для повышения чувствительности БАО и МШУ всех диапазонов, кроме диапазона 92 см, охлаждаются радиационным способом до температур около 150 К (БАО) и 130 К (МШУ). Для этого МШУ диапазонов 1.35, 6.2 и 18 см вынесены из приемников, размещенных в герметичном фокальном контейнере, и установлены на отдельной “холодной плите” в открытом космосе в тени конструкции КРТ. Неохлаждаемый МШУ диапазона 92 см находится внутри термостатируемого приемника в фокальном контейнере при температуре около 30°С. Калибровочные сигналы от внутренних генераторов шума (ГШ) поступают на входы МШУ из приемников по отдельным коаксиальным линиям.

На выходе каждого приемника, после усиления и гетеродинного преобразования сигналов с входных полос частот в те же полосы на промежуточной частоте (ПЧ) вблизи 512 МГц, формируются два вида сигналов: высокочастотный интерферометрический на ПЧ и низкочастотный радиометрический сигнал. Последний образуется в радиометрическом тракте приемника из сигнала на промежуточной частоте после его квадратичного детектирования, усиления и усреднения на интервалах времени около секунды. Радиометрический сигнал дает возможность быстрого и эффективного контроля функционирования КРТ и проведения антенных измерений в режиме одиночного телескопа.

Высокочастотный сигнал на ПЧ с выхода приемника поступает на селектор ПЧ, в котором из 8 ПЧ-выходов от всех приемников выбираются два для их последующего гетеродинного преобразования к более низким частотам и формирования непрерывного цифрового потока интерферометрических видеоданных для передачи на Землю. Фазовая стабильность всех преобразований обеспечивается бортовым водородным стандартом частоты или, в альтернативном штатном режиме, замкнутой фазовой петлей связи с наземным водородным стандартом частоты. Низкочастотные радиометрические сигналы с выходов всех приемников сразу поступают в бортовую телеметрическую систему (ТМС) космического аппарата. ТМС собирает радиометрические и другие низкочастотные данные со всей научной и служебной аппаратуры и формирует другой непрерывный поток данных с КРТ — поток телеметрической информации.

Телеметрические данные передаются на Землю через телеметрический канал (в режимах реального

времени или с разделением времени, если данные помещаются в бортовое запоминающее устройство для временного хранения), который использует малонаправленные антенны на борту и штатные измерительные пункты на Земле⁵. Поток данных в режиме интерферометра передается на Землю в реальном времени через специальный высокоскоростной радиоканал передачи научных данных на частоте 15 ГГц (канал ВИРК). Передающая 1.5-м параболическая антенна ВИРК размещена с тыльной стороны КРТ и КА на днище КА и, в ограниченном интервале углов, может наводиться на приемную 22-м параболическую антенну наземной станции слежения в Пушинской радионавигационной обсерватории Астрокосмического центра ФИАН или на другую станцию слежения. Эти антенны используются также как приемопередающие антенны на частотах 8.4/7.2 ГГц для работы в режиме замкнутой фазовой петли связи.

Чувствительность по антенной температуре σ_T и спектральной плотности потока σ_F КРТ как одиночного телескопа с приемником супергетеродинного типа в радиометрическом режиме (который, в основном, и используется в антенных измерениях) определяется известными соотношениями через эквивалентную температуру шумов системы T_{sys} и эффективную площадь A_{eff} радиотелескопа [43]:

$$\sigma_T = T_{sys} \sqrt{\frac{2}{\Delta\nu\Delta t} + \left(\frac{\sigma_G}{G}\right)^2}, \quad (5.1)$$

$$\sigma_F = \frac{2k_B\sigma_T}{A_{eff}}. \quad (5.2)$$

Здесь σ_G/G — относительная нестабильность коэффициента усиления G приемного тракта, $\Delta\nu$ и Δt — ширина полосы частот по ПЧ (в нашем случае равная ширине полосы входных частот, но вблизи промежуточной частоты 512 МГц) и время интегрирования сигнала после квадратичного детектирования (все эти величины относятся к радиометрическому тракту), k_B — постоянная Больцмана.

Чувствительность σ_{SVLBI} двухантенного интерферометра “КРТ—наземный радиотелескоп”

удобно выразить через T_{sys} и A_{eff} , определяемые для КРТ ($i = srt$) и наземного радиотелескопа ($i = rt$) [44]:

$$\sigma_{SVLBI} = b \sqrt{\frac{F_{sys,srt} F_{sys,rt}}{2\Delta\nu_{IF}\Delta t_c}}, \quad (5.3)$$

$$F_{sys,i} = \frac{2k_B T_{sys,i}}{A_{eff,i}}. \quad (5.4)$$

Здесь для двух уровней регистрации $b = 1/0.637$, $\Delta\nu_{IF}$ — полоса регистрации для каждой поляризации, Δt_c — время усреднения данных в корреляторе, а произведение $2\Delta\nu_{IF}\Delta t_c$ равно количеству независимых отсчетов за время усреднения Δt_c . Удобство использования величины F_{sys} (“эквивалентной спектральной плотности потока для системы”) или, как ее часто обозначают, SEFD (System Equivalence Flux Density) связано с простотой ее прямого измерения с помощью квазиточечного источника с известной спектральной плотностью потока излучения F_s :

$$F_{sys} = F_s \frac{U_{sys}}{U_s g}, \quad (5.5)$$

$$g = \frac{\int_{4\pi} T_b(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} T_b(\vartheta, \varphi) D(\vartheta, \varphi) d\Omega}, \quad (5.6)$$

где $U_{sys}/U_s = T_{sys}/T_s$ — непосредственно измеряемое на радиометрическом выходе приемника отношение продетектированных откликов на шумы системы T_{sys} и на прохождение источника с антенной температурой T_s через диаграмму направленности КРТ, а $g \geq 1$ — коэффициент частичного разрешения источника, который может быть рассчитан численно при известной диаграмме направленности $D(\vartheta, \varphi)$ радиотелескопа и известном распределении яркостной температуры $T_b(\vartheta, \varphi)$ по объекту ($g = 1$ для точечного источника). Интегрирование в (5.6) проводится по телесному углу Ω . Для дополнительного контроля стабильности системы удобно использовать также аналогичные (5.4) и (5.5) соотношения для амплитуды F_{NS} ГШ в единицах эквивалентной спектральной плотности потока $F_{NS} = 2 k_B T_{NS}/A_{eff}$ и $F_{NS} = F_s U_{NS}/(U_s g)$ [45], так как F_{sys} , в отличие от F_{NS} , в общем случае зависит от направления на источник через антенную T_{sky} и яркостную $T_{b,sky}(\vartheta, \varphi)$ температуры неба (см. ниже соотношения (5.7) и (5.7a)).

Ожидаемые значения эквивалентной температуры собственных шумов радиотелескопа T_{sys} и внутреннего калибровочного генератора шума T_{NS} , приведенные (“пересчитанные”) к раскрытию антенны от известных паспортных значений эквивалентных шумовых температур T_{LNA} приемника и

⁵ При включенных научных приемниках служебные передатчики выключены, информация ТМС в реальном времени через служебный канал не передается, а записывается в бортовое запоминающее устройство — для временного хранения и последующей передачи в удобное время. Но при работе КРТ в интерферометрическом режиме (который при необходимости используется также в антенных измерениях, в режиме одиночного телескопа) оба потока данных могут объединяться и передаваться в реальном времени через канал ВИРК, что обычно и делается. В этом случае поток телеметрической информации размещается в заголовках кадров высокоскоростного интерферометрического потока данных.

$T_{NS,LNA}$ ГШ на входе блока МШУ приемника, с учетом антенной температуры неба, рассчитывались по известным формулам (ср. с [25]):

$$T_{sys} = T_{sky} + T_1 + \frac{T_2}{K_1} + \frac{T_3}{K_1 K_2} + \frac{T_{LNA}}{K_1 K_2 K_3}, \quad (5.7)$$

$$T_{sky} = \frac{\int_{4\pi} T_{b,sky}(\vartheta, \varphi) D(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} D(\vartheta, \varphi) d\Omega}, \quad (5.7a)$$

$$T_i = t_i(L_{i,a} - 1),$$

$$K_i = 1/L_i = 1/(L_{i,a}L_{i,r}), \quad i = 1, 2, 3, \quad (5.7б)$$

$$T_{NS} = \frac{T_{NS,LNA}}{K_1 K_2 K_3}. \quad (5.7в)$$

Здесь обозначены: антенная T_{sky} и яркостная $T_{b,sky}(\vartheta, \varphi)$ температуры неба, эквивалентная температура T_i собственных шумов, приведенная ко входу i -того элемента, физическая температура t_i , коэффициент передачи K_i по мощности и коэффициенты активных $L_{i,a}$ и реактивных $L_{i,r}$ потерь для i -того элемента антенно-фидерного тракта радиотелескопа, $i = 1$ – для зеркала (“dish”), $i = 2$ – для БАО (“feed”), $i = 3$ – для волноводной или коаксиальной линия связи БАО с МШУ (“cbl”). Для удобства в скобках указаны нижние индексы, соответствующие обозначениям аналогичных параметров в [25]. Обозначения в (5.7а) для неба аналогичны обозначениям в (5.6) для источника, интегрирование проводится по телесному углу.

5.2. Цель и задачи антенных измерений

Цель автономных антенных измерений состоит в получении основных параметров КРТ в полете, а также в текущем и дальнейшем обеспечении работ с наземно-космическим радиоинтерферометром. Это достигается решением следующих задач.

1. Измерить шумовые характеристики радиотелескопа в рабочих диапазонах длин волн 92, 18, 6.2 и 1.35 см: эквивалентную шумовую температуру системы T_{sys} и эквивалентную плотность потока излучения системы F_{sys} . Под системой понимается радиотелескоп, состоящий из антенны, антенно-фидерного тракта и приемника, с поступающим на его вход шумовым сигналом от интегрального фона неба, а шумовая температура системы приводится ко входу радиотелескопа, т.е. к плоскости раскрытия зеркала. Таким образом, в температуру шума системы “автоматически” включается температура шума неба (ср. с формулой (5.7)).

2. Измерить эффективную площадь A_{eff} на рабочих длинах волн с помощью наблюдений астрономических калибровочных объектов радиоизлучения в непрерывном спектре, используя при этом значения шумовой температуры калибровочного сигнала от внутреннего ГШ, определенные по результатам наземных испытаний.

3. Измерить ширину и форму главного лепестка диаграммы направленности во всех рабочих диапазонах длин волн.

4. Измерить радиоастрономические поправки наведения КРТ по отношению к системе координат по звездным датчикам.

5.3. Подготовка и проведение измерений

Представленные ниже радиоастрономические измерения основных параметров орбитального телескопа (“антенные измерения”) были частью программы летных испытаний космического аппарата и КРТ, выполнявшейся в первые полгода после запуска. Такие измерения планируется регулярно осуществлять на протяжении всего периода работы с КРТ в полете. К началу проведения антенных измерений в середине сентября 2011 г. были выполнены следующие технические операции.

1. Проверена работоспособность антенны и приемников в радиометрическом режиме для каждого из двух поляризационных каналов приемников (левой и правой круговых поляризаций) в рабочих диапазонах длин волн 92, 18, 6.2 и 1.35 см.

2. Проверена реализуемость управления и проектных режимов движения КРТ в инерциальной прямоугольной системе координат XYZ , жестко связанной с центром масс космического аппарата, по заданиям с Земли и с бортового запоминающего устройства. Проверена возможность представления заданий и получения результатов в астрономической экваториальной системе координат “прямое восхождение–склонение” на эпоху J2000.0. Ось X космического аппарата выбрана совпадающей с геометрической осью зеркала КРТ, ось Y – параллельно оси поворота солнечных батарей. Режимы движения КРТ аналогичны режимам наземных радиотелескопов: “Наведение”, “Сопровождение”, “Сканирование”. Режим “Сопровождение” для КРТ эквивалентен поддержанию постоянной ориентации телескопа в пространстве и, как и два других режима, осуществляется с помощью исполнительных органов системы управления ориентацией космического аппарата с контролем по звездным датчикам, без использования реактивных двигателей при наблюдениях (см. раздел 4). Наведение на источник и сканирование источника выполняется в прямоугольной системе координат космического аппарата поворотами аппарата вокруг осей Y или Z . Пересчет в астрономическую

экваториальную систему координат осуществляется по телеметрическим данным от служебной системы координатного обеспечения. В общем случае сканы источника в картинной плоскости представляют собой практически прямые отрезки траекторий, отражающие сечение небесной сферы осью X в системе экваториальных координат (см. пример далее в разделе 5.5 на рис. 7б на цветной вклейке и рис. 8в с соответствующими откликами радиотелескопа и траекториями сканирования).

Методика проведения радиоастрономических антенных измерений унифицирована и идентична для каждой длины волны. В каждом сеансе (обычно в течение около 2 ч) проводились измерения в одном из выбранных режимов сканирования одновременно по всем задействованным диапазонам и поляризационным каналам (как правило, по 2 поляризационных канала в 2 диапазонах, см. типичные примеры далее на рис. 7а, 7б на цветной вклейке и рис. 8а, 8б). В зависимости от программы формирования кадров и скорости опроса датчиков, задаваемых командами на телеметрическую систему, в серии из нескольких последовательных кадров регистрируются все телеметрируемые параметры задействованной научной и служебной аппаратуры, включая сигналы радиометрических аналоговых и цифровых выходов приемников, коды бортовой шкалы времени и координатного обеспечения. При этом период кадров может варьироваться от долей до нескольких секунд. Использование процедуры “автоматических” антенных измерений в “щадящем” режиме⁶ работы научных приемников, который стал штатным, позволило избежать как опасности выхода из строя высокочувствительных транзисторных усилителей приемников, так и влияния возможных помех от внеполосного воздействия сигнала штатного передатчика через слабонаправленные служебные антенны. Приятной неожиданностью стало практически полное отсутствие помех антенным измерениям КРТ в полете во всех диапазонах, в отличие от наземных испытаний.

5.4. Телеметрические данные и обработка

Исходная телеметрическая информация с данными антенных измерений по каждому сеансу поступает для дальнейшей обработки и анализа в Центр обработки научной информации (ЦОНИ) АКЦ ФИАН. Эта информация включает в себя:

⁶ Т.е. при выполнении следующих условий: 1) заранее согласованная на сеанс циклограмма полетного задания; 2) без вмешательства оператора в процесс выполнения задания; 3) при выключенном передатчике и с записью телеметрии в бортовое запоминающее устройство (вместо передачи телеметрии в реальном времени на Землю через служебный канал связи).

а) пользовательские текстовые формуляры обмена для каждого прибора, передаваемые через специализированную базу данных ЦИТРУС НПО им. С.А. Лавочкина;

б) исходный двоичный файл с расширением `tm1`, в который записан весь поток кадров телеметрической информации с упакованными бинарными данными по всем приборам, переданный из бортового запоминающего устройства через штатный телеметрический канал; этот файл формируется в НПО им. С.А. Лавочкина и Институте космических исследований (ИКИ) РАН и размещается на ftp-сервере ЦОНИ АКЦ ФИАН;

в) исходный двоичный файл с расширением `tm1`, в который записан такой же поток кадров телеметрической информации, как и описанный в предыдущем пункте, но переданный в реальном времени в потоке видеоданных через научный канал — высокоинформативный канал ВИРК; файл формируется в АКЦ ФИАН и тоже размещается на ftp-сервере ЦОНИ АКЦ ФИАН⁷.

Обработка бинарного `tm1`-файла дает шесть табличных файлов в текстовом формате со значениями всех 600 научных телеметрируемых параметров КРТ, включая радиометрические, и осуществляется специально разработанной в АКЦ ФИАН Автоматизированной системой обработки и визуализации сеансов телеметрии (АСОВИСТ) [46]. В каждом файле с текстовой таблицей индивидуальные телеметрируемые параметры распределены по столбцам, а их поведение во времени отражено последовательностью кадров по строкам, что упрощает последующий графический анализ данных.

Обычно при дальнейшей обработке антенных измерений, для надежности и взаимного контроля, использовались файлы с результатами в текстовом формате, полученные из исходной двоичной телеметрической информации с помощью двух специализированных систем — ЦИТРУС НПО им. С.А. Лавочкина и АСОВИСТ АКЦ ФИАН. При получении зависимости текущих координат траектории движения оси космического радиотелескопа от бортового времени всегда использовались данные штатного координатного обеспечения в системе ЦИТРУС. При необходимости выполнялась интерполяция координат и контролировалась

⁷ Программными средствами ТМКРТ АКЦ ФИАН телеметрическая информация для этого файла выделяется из заголовков кадров, передаваемых через канал ВИРК и наземную станцию слежения, и используется для формирования бинарного файла телеметрии с расширением `tm1`, который полностью аналогичен по своей структуре и формату `tm1`-файлу, поступающему через телеметрический радиоканал. Это упрощает его обработку программами обработки “штатного `tm1`-файла”, протестированными ранее в приемо-сдаточных испытаниях КРТ.

равномерность движения космического аппарата. Далее текстовые данные преобразовывались в графический вид и обрабатывались различными способами.

Визуализация текстовых результатов (для их печати или последующей обработки) осуществлялась системой АСОВИСТ с использованием пакета общего назначения Gnuplot в операционной системе Linux. В ОС Windows использовались пакеты типа Excel и разработанная в ИКИ РАН специализированная программа TMI_VIEWER. Для экспресс-контроля наблюдений с помощью одновременной визуализации до 14 радиометрических выходных сигналов (8 цифровых и 6 аналоговых), поступающих в бинарном потоке по каналу ВИРК (или в альтернативном варианте — из tmi-файла), был разработан специализированный комплекс программ KRTVIZ. Он позволяет в локальной сети АКЦ ФИАН контролировать процесс регистрации бортовых наблюдений в реальном времени.

Несмотря на ряд специфических особенностей, методика обработки антенных измерений КРТ практически не отличалась от известной методики, используемой в антенных измерениях на наземных радиотелескопах [45]. Результаты, полученные различными способами, сравнивались, и при обнаружении заметных отличий их причины выяснялись и устранялись.

5.5. Результаты

Основные результаты суммированы в табл. 2 (измерения), а также в табл. 3 (анализ измерений) в Приложении. В табл. 2 включены также основные результаты наземных радиоастрономических испытаний технологической модели КРТ на полигоне в Пушинской обсерватории АКЦ ФИАН, полученные в 2003–2004 гг. [47]. Типичные радиометрические отклики на примерах первых сканирований показаны на рис. 7а (цветная вклейка), 8а и 8б для диапазонов 92, 18, 1.35 и 6.2 см по наблюдениям Кассиопеи-А (первого из астрономических объектов, наблюдавшихся с космическим радиотелескопом с 27 сентября 2011 г.) и на рис. 7б (цветная вклейка) по наблюдениям Крабовидной туманности в диапазонах 1.35 и 6.2 см. Пример сканирования площадки неба дан на рис. 8в. Приведенным на нем траекториям соответствуют радиометрические отклики на рис. 7б. Для антенных измерений использовались также Юпитер, Луна и Дева-А (протяженные объекты) и квазиточечные внегалактические радиисточники 3С 84, 3С 273 и 3С 279.

Характеристики стандартных калибраторов (поток, распределение яркости, угловые размеры, поляризация) брались из литературы [48], а потоки

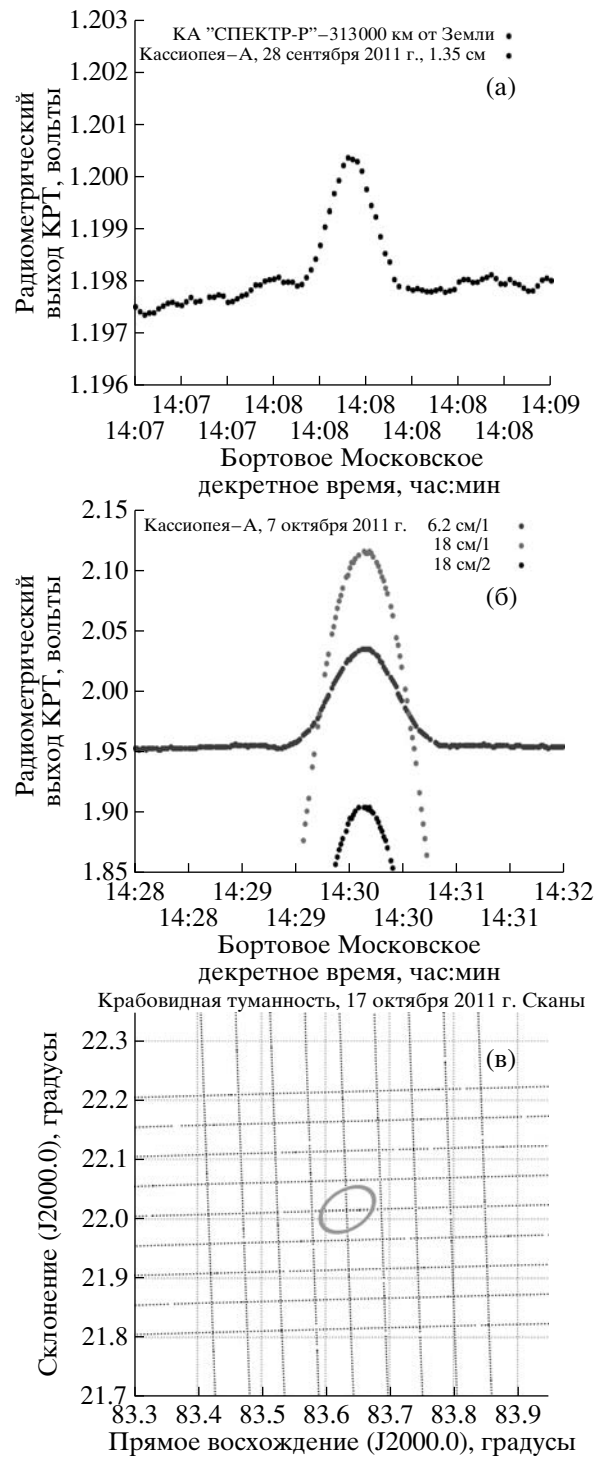


Рис. 8. Первый радиометрический отклик КРТ по наблюдениям Кассиопеи-А в диапазоне 1.35 см 28 сентября 2011 г. (а) и в диапазоне 6.2 см 7 октября 2011 г. на фоне одновременных откликов в ортогональных поляризациях на длине волны 18 см (б). Траектории сканирования участка неба с Крабовидной туманностью 17 октября 2011 г. (в), которым соответствуют отклики сигналов в диапазонах 1.35 и 6.2 см, приведенные на графике 7б цветной вклейки. Условный контур в центре характеризует угловые размеры радиисточника.

Таблица 2. Основные ожидаемые (1.1–1.10) и измеренные (2.1–2.10) параметры КРТ в диапазонах длин волн К, С, L, P: ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности $\vartheta_{0.5}$ и $\varphi_{0.5}$, эффективная площадь A_{eff} , коэффициент использования площади КИП, эффективная температура шума системы T_{sys} и приемника T_{rec} , эффективная плотность потока излучения системы $F_{sys} \equiv SEFD$, систематическая ошибка при сканировании $\Delta\vartheta_s$ по оси ϑ и $\Delta\varphi_s$ по оси φ после ввода постоянной поправки $\delta\vartheta_p$ в наведение телескопа, чувствительность интерферометра σ_{SVLBI} , отношение α_D измеренной ширины главного лепестка диаграммы направленности к его идеальной ширине λ/D , где $D = 10$ м — диаметр зеркала

Параметр	К(1.35 см)	С(6.2 см)	L(18 см)	P(92 см)
1. КРТ в Пушино, 2003–2004:				
1.1 $\vartheta_{0.5} \pm 5\%$,	5.6'	25.5'	74.5'	6.2°
1.2 $A_{eff} \pm 10\%$, м ²	27	40	40	24
1.3 КИП = $A_{eff}/A_{geom} \pm 10\%$	0.34	0.51	0.51	0.31
1.4 T_{sys}/T_{rec} , К	80/45	70/30	50/15	140/30
1.5 $T_{sys}^{(opt)}$, К	70	66	33	164
1.6 $SEFD_{srt}^{(opt)}$, Ян	7200	4600	2300	19000
1.7 $SEFD_{GB}$, Ян	23	8	10	55
1.8 $\Delta\nu_{IF}$, МГц	32	32	32	16
1.9 $\sigma_{SVLBI}^{(opt)}$ (при $\Delta t = 5$ мин), мЯн	5	2	2	16
1.10 $\alpha_D = \vartheta_{0.5}D/\lambda$	1.21	1.20	1.20	1.18
2. КРТ в полете, 2011–2012:				
2.1 $(\vartheta_{0.5} \pm 5\%) \times (\varphi_{0.5} \pm 5\%)$,	6.0' × 13'	25'	72'	6.1°
2.2 $A_{eff} \pm 13\%$, м ² ;	7.5	35	41	30
2.3 КИП = $A_{eff}/A_{geom} \pm 13\%$	0.1	0.45	0.52	0.38
2.4 $T_{sys} \pm 13\%$, К	77	130	45	200
2.5 $F_{sys} \pm 10\%$ ($SEFD_{srt}$), Ян	30000	10500	3400	19000
2.6 $ \Delta\vartheta_s $,	1.2' ± 0.2'			
2.7 $ \Delta\varphi_s $,	<1.5'			
2.8 $\delta\vartheta_p$,	2.5'			
2.9 σ_{SVLBI} (при $\Delta t = 5$ мин), мЯн	9	4	2	16
2.10 $\alpha_D = (\vartheta_{0.5} \times \varphi_{0.5})D/\lambda$	1.29 × 2.80	1.17	1.16	1.16

Примечание. 1. Значения параметров 1.1–1.3, 1.10 даны по результатам наземных испытаний КРТ в Пушино в 2003–2004 гг. [47]. Перед наземными измерениями зеркало КРТ было закреплено на специальном бандажном каркасе, поставлено на поворотное устройство и отъюстировано геодезическими методами. Через дробь в строке 1.4 (T_{sys}/T_{rec}) указаны две температуры шума: 1) системы КРТ (ожидаемая, в числителе — теоретическая оценка для высот над Землей больше 10 тыс. км) и 2) приемника (в знаменателе, взята из формуляров на приемники). В строке 1.5 приведена температура шума КРТ по альтернативной оценке потерь в антенно-фидерном тракте КРТ (см. (5.7)). Она использована для оценки ожидаемого значения параметра 1.6 $SEFD_{srt}$ по (5.4). Из [25] взяты значения параметра 1.7 $SEFD_{GB}$ для 100-м радиотелескопа в обсерватории Грин Бэнк, в качестве примера наземного плеча интерферометра, и параметра 1.8 для полосы регистрации. Параметры 1.6–1.8 использованы для оценки ожидаемой чувствительности наземно-космического интерферометра в строке 1.9 по (5.3) при накоплении 5 мин.

2. Параметры 2.1–2.8, 2.10 измерены по летным испытаниям КРТ. Параметр 2.5 для F_{sys} ($SEFD_{srt}$) получен прямыми измерениями по (5.5). В пределах погрешности эти значения $SEFD$ совпадают с расчетными оценками, полученными по формуле (5.4) с использованием параметров 2.2 и 2.4. В строке 2.9 приведена расчетная чувствительность σ_{SVLBI} двухэлементного радиointерферометра “Космос — Земля” для одной поляризации, аналогично параметру 1.9, но оцененная с использованием параметра 2.5.

сильных квазиточечных радиоисточников ЗС 84, ЗС 273 и ЗС 279, являющихся переменными, — по измерениям на 600-м кольцевом радиотелескопе РАТАН-600 САО РАН (Нижний Архыз, Россия) и на 100-м параболаиде в Эффельсберге Института радиоастрономии им. Макса Планка (Бонн, ФРГ) [49] в близкие к бортовым измерениям даты. Процедуру наземных измерений см. в [45, 49].

5.6. Обсуждение результатов

Как известно, при отсутствии фазовых погрешностей, ширина $\vartheta_{0.5}$ главного лепестка диаграммы направленности по половинной мощности и коэффициент использования площади η (КИП), равный отношению эффективной площади к геометрической, зависят от закона распределения амплитуды и фазы электрического поля по раскрытию зеркала антенны и от уровня облучения края зеркала. Для идеального параболического рефлектора с диаметром D круглого раскрытия, при некоторых *типовых* теоретических законах амплитудного распределения синфазного поля, ожидаемые ширина диаграммы $\vartheta_{0.5}$ и КИП η_0 на длине волны λ для синфазного случая могут быть оценены с помощью соотношений [50–52] $\vartheta_{0.5} = \alpha_D \cdot \lambda/D$, где $\alpha_D \approx 1.0–1.5$, и $\eta_0 \approx 1.0–0.55$ в зависимости от конкретного закона распределения поля. При этом, чем меньше уровень облучения края зеркала, тем меньше η_0 (КИП) и больше α_D (шире диаграмма направленности), и они близки к единице только при одинаковой амплитуде поля по раскрытию. Фазовые искажения синфазного поля в раскрытии дополнительно увеличивают коэффициент α_D и уменьшают η_0 , т.е. расширяют главный лепесток диаграммы направленности и уменьшают эффективную площадь.

Сравнивая эти значения α_D с полученными $\alpha_D \approx 1.2$ по измерениям КРТ (см. параметры 1.10 и 2.10 в табл. 2), видим, что для диапазонов 92, 18 и 6.2 см измеренная ширина главного лепестка диаграммы направленности соответствует значениям, близким к теоретически ожидаемым. Наиболее существенные отличия результатов измерений параметров КРТ в полете от параметров проектных или ожидаемых, полученных ранее по испытаниям КРТ в Пушино [47], относятся к эффективной площади и к форме главного лепестка диаграммы направленности в диапазоне 1.35 см, а также к температуре шумов КРТ в диапазоне 6.2 см (табл. 2). Для работы в режиме синтеза широкой полосы частот в диапазоне 1.35 см предусмотрен выбор любой из 8 входных полос. Приведенные результаты относятся к центральной полосе F_0 (см. раздел 2.2.2).

5.6.1. Диапазон 1.35 см (центральная полоса F_0). Измеренное в этом диапазоне поперечное сечение главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности представляет собой примерно эллипс с осями $\vartheta_{0.5} \times \varphi_{0.5} = 6.0' \times 13'$ при относительной ошибке 5%, вместо ожидаемого круга диаметром $(5.6' \pm 10\%)$. Наглядно эта особенность хорошо видна по откликам на сканирование площадки неба с источником (рис. 7б на цветной вклейке и рис. 8в). Измеренная эффективная площадь оказалась равной $(7.5 \pm 13\%) \text{ м}^2$ вместо ожидаемого значения $(27 \pm 10\%) \text{ м}^2$ или хотя бы проектного значения $(23 \pm 15\%) \text{ м}^2$. Эти ожидаемые значения для диаграммы и площади были получены при наземных испытаниях КРТ в Пушино в 2004 г. Отличие полученной в наземных испытаниях эффективной площади от эффективной площади идеальной параболической поверхности $(40–45 \text{ м}^2)$ естественно объяснялось влиянием случайной погрешности реализации поверхности зеркала, выполненной со среднеквадратичным отклонением не хуже проектного значения $\sigma = 0.77 \text{ мм}$, которое было задано в проекте допуском $d = \pm 2 \text{ мм}$ ($|d| = 2.6\sigma$ [43]). Этой же причиной, но при $\sigma \approx 1.4 \text{ мм}$, или другой типичной причиной (систематической квадратичной фазовой погрешностью в раскрытии антенны, — с максимальным значением $\sim 1.5\pi$; см. Приложение) могло бы быть формально объяснено и уменьшение эффективной площади до 7.5 м^2 , если бы не наблюдаемое при этом существенное искажение формы главного лепестка диаграммы направленности.

Искажения диаграммы направленности в параболических антеннах вызываются, в основном, тремя видами систематических фазовых искажений амплитудно-фазового распределения поля в раскрытии зеркала [50–53]: квадратичными, кубическими (комой) и астигматизмом зеркала и/или облучателя. За квадратичные и кубические искажения могут быть ответственны как зеркало или облучатель, так и смещение облучателя из фокуса зеркала — в продольном (для квадратичных искажений) или поперечном (для комы) направлениях к оси параболаида. Астигматизм является следствием того факта, что точки наилучшей фокусировки в двух главных взаимно-ортогональных плоскостях, перпендикулярных раскрытию, не совпадают [50]. Это означает, что оптимальная точка фокусировки для облучателя, установленного в положение с минимальными аберрациями (и соответственно — с минимальной шириной главного лепестка диаграммы направленности), различна в этих плоскостях — в каждой из них своя точка, и единый фазовый центр отсутствует. При этом обычно существует некоторый общий “эквивалентный центр оптимальной фокусировки” или “эквивалентный фазо-

вый центр” вблизи середины этих положений, при установке в который фазовые aberrации и искажения диаграммы направленности удаётся минимизировать [50, 53]. Фазовые погрешности в раскрыве есть сумма всех погрешностей, обусловленных зеркалом, облучателем и смещением облучателя из фокуса зеркала [54, 55]. Поэтому однозначно установить реальную причину фазовых искажений в раскрыве антенны только по результатам летных испытаний, без дополнительных данных или предположений, не представляется возможным.

Как свидетельствует подробный анализ проблемы (см. Приложение), наблюдаемую эллиптичность главного лепестка диаграммы направленности, как и измеренное значение эффективной площади, в диапазоне 1.35 см проще всего объяснить, предположив систематическую квадратичную погрешность в распределении фазы по оси φ порядка 1.5π в раскрыве антенны и астигматизм, обусловленные облучателем, дополнительно к случайной погрешности реализации параболической поверхности зеркала КРТ с проектным значением среднеквадратичного отклонения $\sigma = 0.77$ мм, использованным выше. Такая систематическая фазовая погрешность по одной оси в раскрыве могла бы, например, возникать при астигматизме облучателя с квадратичной фазовой погрешностью и одновременном смещении центра оптимальной фокусировки облучателя относительно фокуса зеркала на величину порядка 0.3 см вдоль оси параболоида, при расстоянии $b \sim 2$ см между двумя такими центрами фокусировки облучателя. В пользу этого предположения свидетельствуют результаты оценок в одной из моделей фазовых искажений в Приложении, использующей результаты численного расчета [56] амплитудно-фазовой диаграммы направленности БАО. Расчет [56] указывает на возможность астигматизма и квадратичных aberrаций облучения зеркала со значениями, близкими к необходимым для объяснения результатов измерений в диапазоне 1.35 см.

Предпринятые попытки (см. Приложение) дать согласованное аргументированное объяснение всей совокупности антенных измерений без астигматизма облучателя в этом диапазоне успеха не имели. Но это только одно из возможных объяснений. Формально можно также предположить, что полученные систематические фазовые погрешности в раскрыве вызваны не облучателем, а зеркалом антенны. Однако для такого вывода в настоящий момент нет достаточных оснований и данных для количественного анализа. Простой близкий вариант для объяснения асимметрии диаграммы направленности — гипотеза о соответствующей сильной асимметричной деформации зеркала — так, чтобы размер раскрыва антенны в одной из плоскостей уменьшился примерно вдвое

(до 5 м), должен был бы сказаться на результатах во всех диапазонах. А это противоречит “хорошим” результатам антенных измерений в диапазонах 6.2, 18 и 92 см, которые близки к проектным.

5.6.2. Диапазоны 6.2, 18 и 92 см. В отличие от других диапазонов все измерения в диапазоне 6.2 см проведены при раздельной работе с поляризационными каналами. Одновременное их включение сразу приводило к зашкалу выходных сигналов, которое не устранялось аттенуаторами. Зарегистрированы также искажения автоспектра выходных видеополос для канала с правой поляризацией в интерферометрическом режиме. Эти факты позволяют предположить, что на участке “вход БАО—вход МШУ” антенно-фидерного тракта в диапазоне 6.2 см ухудшилось согласование поляризационных каналов БАО со свободным пространством и/или с МШУ и ухудшилась развязка между каналами. Это привело к увеличению реактивных и активных потерь на этом участке при раздельном включении каналов и, как следствие, к увеличению шумовой температуры системы согласно (5.7), а также к самовозбуждению МШУ при одновременной работе каналов. Исследование продолжается.

Во всех антенных измерениях использовались предварительные значения антенной температуры T_{NS} ГШ, полученные по результатам предполетных наземных измерений и “пересчета” T_{NS} ко входу КРТ согласно формуле (5.7в) по измеренным или рассчитанным потерям [25] в антенно-фидерном тракте. Планировалась их коррекция по результатам летных испытаний. Коррекция для диапазонов 92, 18 и 1.35 см не проводилась. Коррекция T_{NS} ГШ для диапазона 6.2 см проведена: 1) в предположении соответствующего увеличения потерь в БАО (т.е. уменьшения K_2 в соотношениях (5.7б), (5.7в)) и 2) в пренебрежении искажениями от диаграммы направленности облучателя, уменьшающими эффективную площадь, что не противоречит результатам расчета [56] и оценкам параметров 4.2 и 5.2 в табл. 3 для этого диапазона⁸. Эта коррекция привела к соответствующему увеличению полученных значений эффективной площади A_{eff} и эквивалентной шумовой температуры системы T_{sys} в диапазоне 6.2 см (т.е. к “улучшению” A_{eff} и “ухудшению” T_{sys}).

Она же позволила дать общее согласованное объяснение измеренной зависимости эффективной

⁸ Так как в блоке антенных облучателей (БАО) конструктивно объединены облучатели с полосковыми или волноводными формирователями левой и правой круговых поляризаций для каждого диапазона (см. разделы 5.1 и 2), то потери в БАО характеризуют не только потери в самих облучателях (в основном, на высшие типы волн), но и в следующих за ними поляризаторах.

площади КРТ от длины волны во всех диапазонах с помощью единого подхода к учету фазовых погрешностей. И одновременно — объяснить соответствующее повышение шумовой температуры системы согласно (5.7) в диапазоне 6.2 см и, возможно, частично, в диапазоне 92 см: увеличением потерь L_2 в БАО относительно проектных значений⁹. Для шумовой температуры КРТ в диапазоне 92 см существенен также вклад от фонового излучения неба, который, кроме того, может заметно меняться с изменением направления на объект и полностью или частично объяснять 20-процентное превышение измеренной температуры шумов КРТ $T_{sys} = 200$ К над ожидаемой. Минимальный вклад фона неба при антенне, направленной в полюс Галактики, по оценкам, использующим опубликованные распределения яркостной температуры неба и соотношения (5.7), (5.7а), составляет около 60 К, который включен в ожидаемую температуру $T_{sys}^{(opt)} = 164$ К [25].

Стоит подчеркнуть, что потери $L_2 = 1/K_2$ БАО входят в 3 слагаемых в (5.7), что не всегда принимается во внимание при грубых оценках. Заметим также, что, в отличие от калибровки по антенной температуре, необходимой для антенных измерений, обычно используемая в астрономических измерениях “астрономическая калибровка” наземных радиотелескопов и КРТ, — в единицах эквивалентной спектральной плотности потока излучения для системы с помощью F_{sys} (SEFD) и для генератора шума ГШ с помощью F_{NS} , — не зависит от этих особенностей и коррекций, так как пропорциональна T_{sys}/A_{eff} (для SEFD) или T_{NS}/A_{eff} (для F_{NS}), и может выполняться по астрономическим источникам радиоизлучения без знания абсолютных величин антенной температуры T_{NS} ГШ и T_{sys} системы (см. раздел 5.1 и [45]).

5.6.3. Поправки наведения и сканирования.

Поправки измерялись при сканировании площадки с источником по осям ϑ и φ (см. пример на рис. 7б на цветной вклейке и рис. 8в). По результатам такого сканирования находились центральные сечения источника, для которых процесс сканирования многократно повторялся в прямом и обратном направлениях движения по каждой оси. Используя телеметрические данные штатного координатного обеспечения, отдельно для прямого и для обратного направлений сканы усреднялись, и

⁹ Из-за недостатка средств и известных технических проблем калибровки антенных измерений, в том числе и проблем изготовления высококачественных апертурных охлаждаемых согласованных нагрузок, проектная документация содержит только расчетное значение потерь БАО в диапазоне 92 см и результаты косвенных лабораторных измерений или теоретических оценок таких потерь в остальных диапазонах.

вычислялась разность координат между расчетным и измеренным положениями максимума сигнала, которая и определяла искомые поправки к расчетным координатам.

Измеренная величина погрешности координат по оси ϑ (с меньшей шириной диаграммы направленности, равной $\vartheta_{0.5} = 6'$) при сканировании “вперед” систематически отличается от величины при сканировании “назад”, а кривая сканирования имеет характерный для наземных телескопов “двугорбый” вид со значениями, равными $(3.7' \pm 0.2')$ для одного максимума и $1.3' \pm 0.2'$ для другого максимума. По этим данным введена постоянная поправка в наведение $\Delta\vartheta_p = 2.5'$, равная среднему значению между ними, с которой далее работали постоянно. “Двугорбость” при сканировании в противоположных направлениях сохранялась, — примерно с прежним запаздыванием, соответствующим $|\Delta\vartheta_s| = 1.2' \pm 0.2'$ к расчетному значению, — всегда с запаздыванием по времени, независимо от прямого или обратного направления сканирования, но уже относительно нулевого среднего значения между максимумами. Такое запаздывание электрической оси при движении КРТ относительно нового расчетного положения оси мы интерпретировали как систематическую ошибку сканирования (табл. 2). По другой оси поправка не вводилась, так как результаты были в пределах ошибок измерений.

Примерно половина измеренного интервала времени между “горбами” может объясняться эффектом задержки отклика при интегрировании сигнала на радиометрическом выходе (см. об этом эффекте в [57]). Считается, что основная причина двугорбой кривой для наземных телескопов (отсутствующая для КРТ) — люфты в механизмах управления. Причина аналогичного поведения КРТ может быть связана с подобными задержками при интегрировании сигналов в электронике систем звездных датчиков и цепях управления движением космического аппарата или с другими причинами и нуждается в дополнительном изучении. Гипотезе об упругих деформациях штанг, на которых крепится фокальный контейнер КРТ, противоречат результаты анализа телеметрии, свидетельствующие о достаточно равномерной скорости на участках движения.

5.6.4. Шум телеметрии. Анализ телеметрических данных показал наличие дополнительного “шума телеметрии” для цифровых радиометрических выходов в обоих каналах приемников диапазонов 18 и 92 см. Он имеет вид фона, состоящего из “пачек” коротких импульсных выбросов, и характерен для ошибок регистрации отдельных бит: амплитуда их “переменности” не случайна, а систематически повторяется, изменяясь дискретно от “пачки к пачке”. Сравнение с телеметрируемым

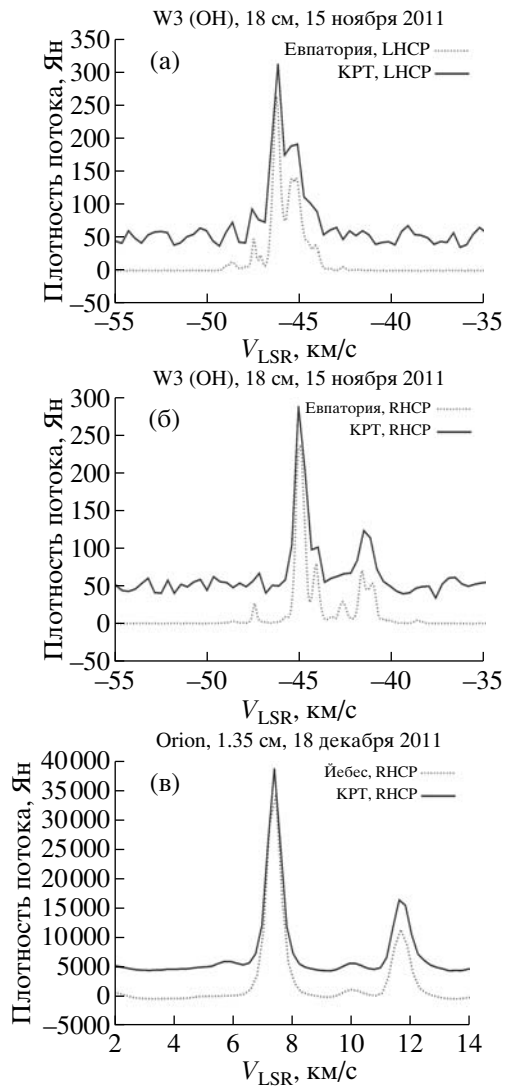


Рис. 9. Одновременные двухантенные наблюдения космических мазерных источников: (а, б) — W3(OH) 30 октября 2011 г. в левой (а) и правой (б) круговых поляризациях на космическом радиотелескопе и 70-м радиотелескопе (Евпатория, Украина) в спектральных линиях диапазона 18 см; (в) — в области звездообразования Orion KL, проведенные на КРТ и на 40-м радиотелескопе (Йебес, Испания) в правой круговой поляризации 18 декабря 2011 г. в диапазоне 1.35 см.

параметром приемников “АЦП готов” позволяет предположить, что этот шум вызван тем, что штатная телеметрическая система, осуществляя опрос всех датчиков с фиксированной скоростью, не учитывает сигнал готовности аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в приемниках. В результате опрос цифровых датчиков иногда осуществляется быстрее реальной готовности АЦП в этих приборах. Впервые такой шум был обнаружен в процессе прямо-сдаточных испытаний. Был найден и при-

менен простой и эффективный способ фильтрации, использование которого позволило устранить эту проблему и в антенных измерениях КРТ в полете. В аналоговых выходах этих диапазонов и во всех выходах приемников двух других диапазонов такой шум отсутствует.

5.7. Автономная проверка интерферометрического режима по радиолиниям

Для испытаний приемной аппаратуры, радиолинии ВИРК и коррелятора в интерферометрическом режиме в диапазонах К и L существует возможность использовать несколько сильных космических источников мазерного излучения в молекулах гидроксила (длина волны 18 см) и воды (длина волны 1.35 см). С этой целью было проведено несколько сеансов измерений, в которых эти объекты наблюдались одновременно в правой и левой круговых поляризациях на КРТ и нескольких наземных телескопах. Были выбраны два мазерных источника на длине волны 1.35 см, — это области звездообразования Orion KL и W3(OH), — и один объект на длине волны 18 см — область W3(OH). Большие потоки и наличие сильно поляризованных компонент в спектрах этих объектов позволяют провести сравнительный анализ характеристик приемно-регистрающей аппаратуры и ее пригодность для проведения подобных наблюдений.

5.7.1. Наблюдения. 1. W3 (OH). Область звездообразования W3(OH) находится на расстоянии около 2 кпк [58] в галактическом рукаве Персея и является одним из наиболее исследованных объектов своего типа. В направлении на W3(OH) наблюдается сильное излучение как в линиях гидроксила, так и в линиях воды (так называемый объект Тернера—Уэлша, приблизительно в $6''$ к востоку от положения мазеров гидроксила). Спектр этого источника содержит поляризованные детали и позволяет провести оценку поляризационных свойств космического радиотелескопа путем сравнения профиля спектров, полученных одновременно на КРТ и на хорошо исследованном наземном инструменте.

2. Orion KL. Известная область звездообразования находится на расстоянии 437 ± 19 пк [59] в созвездии Ориона. Водяной мазер в Орионе испытывает вспышки, в результате которых отдельные спектральные детали достигают плотности потока в несколько миллионов янских [60]. С начала 2011 г. Orion KL находится в очередной фазе усиления активности [61], его поток на момент наблюдений составлял порядка 3.5×10^4 Ян, что делает этот мазер самым сильным объектом подобного класса на небе. Этот объект особенно удобен для наблюдений, так как благодаря большой плотности потока позволяет достичь высокого отношения

сигнал/шум за небольшое время накопления даже с учетом пониженной чувствительности КРТ в диапазоне К.

Наблюдения W3(OH) проводились в октябре и ноябре, а источника Orion KL в декабре 2011 г., в рамках программы испытаний приемной аппаратуры и поиска интерференционных лепестков. Ниже будут анализироваться спектры этих объектов, полученные в автокорреляционном режиме на КРТ (по данным через канал ВИРК) и на наземных радиотелескопах, принимавших участие в одновременных наблюдениях.

5.7.2. Анализ спектров. Как видно из рис. 9а, 9б и 9в, полученные на КРТ профили мазерных линий в диапазонах 1.35 см для источника Orion KL на частоте линии молекул воды 22235.08 МГц и в диапазоне 18 см для объекта W3(OH) на частоте линии гидроксила 1665.4018 МГц практически полностью соответствуют профилям линий, полученным на крупных наземных телескопах. Небольшое наблюдаемое отличие профилей линий спектра, измеренных наземным телескопом и КРТ, скорее всего, объясняется более низким отношением сигнала к шуму на КРТ. На примере рис. 9а и 9б для W3(OH) видно, что благодаря заметной разнице во внешнем виде спектральных деталей в разных поляризациях, легко отождествить принимаемый тип поляризации (левая или правая круговая – ср. с рис. 2 из [62]). Подобные источники могут также служить дополнительным инструментом для контроля наведения и проверки корректности частотной настройки аппаратуры в диапазонах 1.35 и 18 см. Еще одной задачей, которую можно решить в рамках таких исследований, является оценка чувствительности КРТ по данным спектральных наблюдений в диапазонах L и K. Зная параметры наземного телескопа, можно оценить поток от источника на момент наблюдений и получить оценку чувствительности КРТ. Такие оценки были сделаны по наблюдениям W3(OH) в K и L диапазонах и наблюдениям Orion KL в K диапазоне. Полученные оценки SEFD дают значения 3400 Ян для диапазона L и около 36 000 Ян для диапазона K.

5.8. Выводы

1. Полученная эквивалентная температура шума системы КРТ в пределах 20% совпадает с теоретическими оценкам в диапазонах 92, 18 и 1.35 см, но вдвое превышает расчетное значение в диапазоне 6.2 см, что в $\sqrt{2}$ раз снижает ожидавшуюся для этого диапазона чувствительность интерферометра (при фиксированном времени накопления). Причиной такого повышения температуры шума, вероятно, является увеличение потерь в антенно-фидерном тракте (скорее всего, на участке от БАО

до МШУ) по сравнению с потерями, рассчитанными на основе лабораторных измерений, выполненных на Земле.

2. Ширина главного лепестка диаграммы направленности КРТ по уровню половинной мощности в пределах погрешности близка к теоретически ожидаемым и измеренным в наземных испытаниях значениям в диапазонах 92, 18 и 6.2 см, но заметно отличается от таковых в диапазоне 1.35 см: поперечное сечение главного лепестка по уровню половинной мощности на длине волны 1.35 см близко к эллиптическому с осями $\vartheta_{0.5} \approx 6.0' \pm 5\%$ и $\varphi_{0.5} \approx 13' \pm 5\%$ вместо проектной окружности диаметром $5.5' \pm 10\%$. При этом профиль продольного сечения главного лепестка в той плоскости, где он шире, заметно асимметричен.

3. Эффективная площадь КРТ в полете близка к расчетной или измеренной в наземных испытаниях в диапазонах 92, 18 и 6.2 см. В диапазоне 1.35 см она меньше ожидаемой по наземным измерениям площади ($27 \pm 10\%$) м² в 3.6 раза и проектной площади ($23 \pm 15\%$) м² – втрое, что почти в 2 раза уменьшает ожидаемую чувствительность в интерферометрическом режиме (при фиксированном времени накопления).

4. Оценки, выполненные на основе расчетных значений амплитудно-фазовой диаграммы направленности блока антенных облучателей и простой модели фазовых погрешностей в антенно-фидерной системе, приводят к следующим выводам о КРТ в полете:

- средний профиль поверхности зеркала антенны может быть близким к параболическому с проектным значением среднеквадратичного отклонения реальной поверхности зеркала от средней, равным 0.77 мм;

- облучатель антенны может иметь: а) квадратичные фазовые погрешности с максимальным значением погрешности фазы облучения края зеркала, равным примерно -100° в диапазоне 1.35 см и -35° в диапазонах 6.2 и 18 см (согласно расчетным значениям фазовой диаграммы направленности этих облучателей); б) астигматические aberrации в диапазоне 1.35 см, аппроксимируемые двумя эквивалентными центрами фокусировки облучателя, – центрами 1 и 2 в ортогональных плоскостях 1 и 2, соответственно, – вынесенными из фокуса зеркала примерно на 7 мм к зеркалу в плоскости 1 и на 13 мм от зеркала в плоскости 2; в) общий центр оптимальной фокусировки облучателя (середины между центрами 1 и 2), который вынесен из фокуса раскрывшейся антенны примерно на 3 мм от зеркала в продольном направлении оси антенны;

- эти фазовые погрешности облучения поверхности зеркала антенны могут быть основными причинами измеренного уменьшения эффективной

площади и эллиптичности главного лепестка диаграммы направленности КРТ в диапазоне 1.35 см относительно проектных значений.

5. По результатам радиоюстировки средние погрешности наведения по одной оси (с меньшей шириной главного лепестка диаграммы направленности КРТ) составили $3.7' \pm 0.2'$ при сканировании источника в одном направлении и $1.3' \pm 0.2'$ при сканировании в противоположном направлении. Частично этот результат может объясняться эффектом запаздывания отклика из-за интегрирования сигнала на радиометрическом выходе и нуждается в дополнительном изучении. По этим измерениям введена постоянная поправка наведения $\Delta\vartheta_p = 2.5'$, с которой далее работали постоянно. Оставшаяся погрешность сканирования $|\Delta\vartheta_s| = 1.2' \pm 0.2'$ характеризует запаздывание максимума сигнала относительно его расчетного положения при сканировании в любом направлении и вызвана систематической погрешностью при движении антенны. По другой оси (с большей шириной главного лепестка диаграммы) погрешность наведения лежит в пределах точности измерений, не превышая $1.5'$, и не компенсировалась в дальнейших наблюдениях.

6. Сравнение автокорреляционных спектров двух сильных мазерных источников в диапазонах L и K позволяет сделать вывод о штатном функционировании спектрального режима наблюдений космическим радиотелескопом и позволяет контролировать частотные настройки и режимы поляризации при наблюдениях. Оценки чувствительности КРТ, проведенные в рамках наблюдений спектральных радиолиний, согласуются с данными исследований по источникам непрерывного спектра. Незавершенной остается задача полного определения поляризационных параметров радиотелескопа, что возможно при специально запланированных наблюдениях нескольких ярких источников мазерного излучения, в частности, Orion KL.

6. ПРОВЕРКА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА (ПЕРВЫЕ ЛЕПЕСТКИ) И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В данном разделе представлен краткий обзор первых результатов, полученных в интерферометрическом режиме. Эти результаты будут подробнее обсуждаться в отдельных статьях позднее, международными группами по поиску лепестков и Ранней научной программе после завершения всестороннего анализа.

Детектирование интерференционного сигнала между космической обсерваторией “РадиоАстрон”

и наземными радиотелескопами продемонстрировало общую успешную работу комплексной РСДБ системы “Космос–Земля” во всех четырех диапазонах длин волн: 92, 18, 6.2 и 1.35 см (рис. 7в–7ж на цветной вклейке). Первый сигнал космического интерферометра был получен по наблюдениям 15 ноября 2011 г. квазара 0212+735 в диапазоне 18 см при удалении КА от Земли, составившим около 100 000 км, и проекции базы “РадиоАстрон” – 100-м радиотелескоп в Эффельсберге (Германия) на картинную плоскость источника $B = 8100$ км (рис. 7в на цветной вклейке). Всего ко времени написания статьи проведено 20 сеансов испытаний интерферометра. На рекордном удалении КА в 300 000 км (проекция базы составила около 220 000 км) 25 января 2012 г. были проведены интерферометрические наблюдения пульсара PSR 0950+08 в диапазоне 92 см с участием самого крупного наземного радиотелескопа диаметром 300 м в обсерватории Аресибо (США) (рис. 7е, 7ж на цветной вклейке). Большинство интерферометрических наблюдений проводилось в режиме с бортовым водородным мазером, но были выполнены и успешные сеансы испытаний интерферометра в режиме передачи на космический аппарат когерентного сигнала от водородного стандарта Станции слежения в Пушино с обратной передачей его с аппарата на Станцию слежения (так называемый “режим замкнутой фазовой петли”).

В режиме интерферометра чувствительность системы двух телескопов пропорциональна квадратному корню из произведения эффективной площади этих телескопов, и, таким образом, сочетание 10-м КРТ со 100-м наземным радиотелескопом становится эквивалентным по чувствительности системе двух 30-м телескопов. Режим наземно-космического интерферометра не позволяет получать результат исследования сразу после проведения измерений. Зарегистрированные на различных радиотелескопах научные данные передаются в центр обработки для первичной корреляции (обнаружения интерферометрического отклика). Эта первичная корреляция может быть выполнена только после высокоточной реконструкции орбиты КА в баллистическом центре.

Обработка и анализ результатов, полученных на наземно-космическом интерферометре “РадиоАстрон”, производится в АКЦ ФИАН совместно с другими участниками проекта. Здесь, в первую очередь, выполняется кросс-корреляционная обработка потоков данных, записанных на отдельных радиотелескопах с плотностью записи 128 или 256 Мбит/с, включая космический сегмент КРТ (128 Мбит/с), с помощью созданной в АКЦ ФИАН

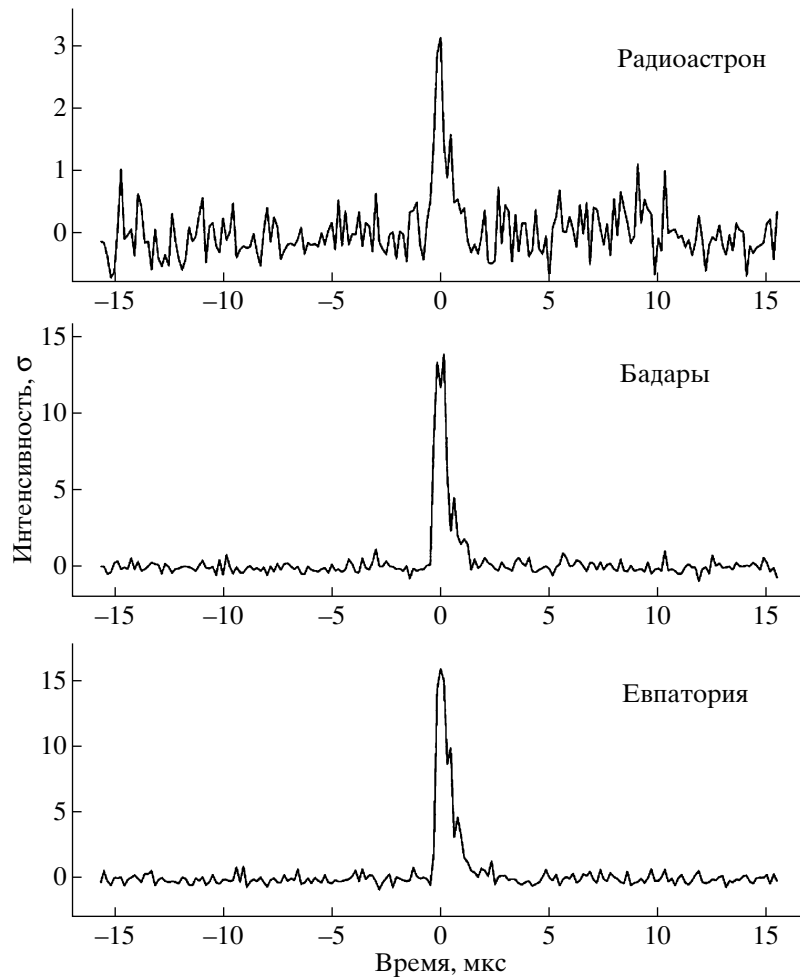


Рис. 10. Одновременные трехантенные наблюдения гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности 14 ноября 2011 г., выполненные космическим радиотелескопом, российским 32-м радиотелескопом обсерватории “Бадары” ИГА РАН (вблизи Иркутска) и украинским 70-м радиотелескопом в Евпатории в диапазоне 18 см.

системы регистрации РДР-1 [63] и регистратора Mark5 [64] разработки США. Программный FX-коррелятор АКЦ ФИАН построен на базе вычислительного кластера с производительностью 1 Тфлоп/с и RAID-системой хранения информации емкостью до 220 Тбайт. Технические характеристики процессорного кластера ЦОНИ АКЦ ФИАН позволяют принимать поток данных от 10 станций, включая КРТ, с интегральной скоростью до 2.56 Гбит/с и, соответственно, обрабатывать потоки до 45 формируемых в эксперименте баз интерферометров. Это может выполняться практически без снижения темпа записанных в реальном времени и сохраненных в ЦОНИ данных наблюдений.

Само по себе обнаружение интерферометрического отклика еще не является окончательным результатом научного исследования. Однако, при определенных предположениях о структуре компактной детали, оно позволяет оценить ее угло-

вой размер и яркостную температуру. Для достоверного заключения о строении исследуемого объекта необходимы многократные наблюдения с различными конфигурациями телескопов и, прежде всего, — при разных положениях космического аппарата на его орбите. Необходимый набор таких конфигураций может быть реализован как минимум в течение одного календарного года. Стратегия наблюдений состоит в исследовании определенной выборки радиоисточников в течение целого года (а иногда и нескольких лет), после чего всесторонний анализ дает возможность сделать обоснованные заключения о структуре и физических условиях в изучаемых космических объектах.

Ранняя научная программа “РадиоАстрон” курируется АКЦ ФИАН и проводится с февраля 2012 г. международными коллективами исследователей, сформированными в рамках проекта. К настоящему времени измерены интерферомет-

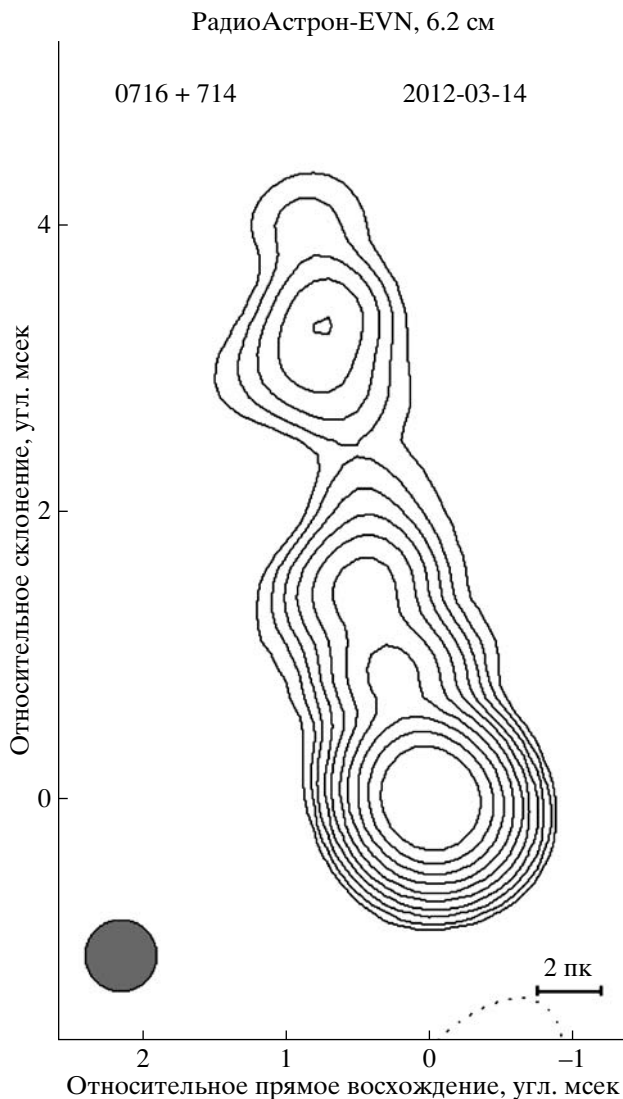


Рис. 11. Изображение быстропеременного объекта типа BL Lacertae 0716+714, полученное по данным на длине волны 6.2 см. Наблюдения проведены совместно КРТ и Европейской РСДБ-сетью 14–15 марта 2012 г. в рамках Ранней научной программы проекта “РадиоАстрон” по активным ядрам галактик. Карта восстановлена с использованием диаграммы направленности шириной 0.5 мсек. дуги по уровню половинной мощности, сечение которой показано в левом нижнем углу рисунка. Контуры проведены по уровню равной интенсивности с возрастанием в два раза для каждого следующего уровня, начиная с 0.25 мЯн/луч. Интенсивность в максимуме равна 0.43 Ян/луч. “Луч” (“beam”) есть телесный угол показанного сечения.

рические отклики от пульсаров PSR 0950+08, PSR 0531+21 (Crab) и PSR 0833-45 (Vela), PSR 1919+21, от активных ядер галактик 0212+735, 0716+714, 0748+126, 0754+100, 2013+370, 0851+202 (OJ287), 1954+513, 2200+420 (BL Lac), от

галактического мазера W51 (см. Информационные сообщения проекта “РадиоАстрон” за 2011–2012 г. [65]). Эти отклики получены для проекций базы наземно-космического интерферометра на картинную плоскость исследуемого источника размерами от менее 10 000 км до около 250 000 км, т.е. примерно до 20 диаметров Земли.

14 ноября 2011 г., после подтверждения наблюдаемости на КРТ гигантских радиоимпульсов от пульсара в Крабовидной туманности (расстояние 1 кпк), в диапазоне 18 см была впервые найдена корреляция между этими импульсами, зарегистрированными КРТ и наземными радиотелескопами в Евпатории и обсерваториях “Светлое”, “Зеленчукская” и “Бадары” ИПА РАН при проекциях базы интерферометров на картинную плоскость источника до $B = 40\,000$ км (рис. 10). Этот факт свидетельствует о том, что рассеяния изображения в межзвездной среде от пульсара до наблюдателя на длине волны 18 см было не более углового разрешения интерферометра, которое составило 400 мсек. дуги.

Интерферометрические наблюдения обычных импульсов близкого (260 пк) пульсара PSR 0950+08 (рис. 7е на цветной вклейке) не обнаружили межзвездного рассеяния изображения даже в диапазоне 92 см при проекции базы интерферометра вплоть до $B = 220\,000$ км. Тем самым впервые практически в метровом диапазоне длин волн достигнуто угловое разрешение в 370 мсек. дуги. Наблюдения того же пульсара в течение 1 ч (рис. 7ж на цветной вклейке) позволили впервые обнаружить переменность функции видности интерферометра при столь больших базах интерферометра, что открывает путь к изучению параметров турбулентности межзвездной плазмы и достижению еще более высокого углового разрешения источника с использованием принципа “межзвездного интерферометра” [66]. Для другого близкого пульсара Vela, расстояние до которого ~ 300 пк, рассеяние в межзвездной среде было зафиксировано. В мае 2012 г. крупнейшие радиотелескопы южного полушария провели совместно с КРТ наблюдения этого пульсара на волне 18 см. В этих наблюдениях участвовали радиотелескопы обсерваторий Паркс, Мопра, Хоббарт (все Австралия) и Хартбизтхоук (ЮАР), а также антенна НАСА в Тидбинбилла (Австралия). Обработка данных показала, что при проекции базы в 100 000 км полностью изменяется структура интерференционного отклика (наблюдается множество узких всплесков), что указывает на многолучевое распространение радиоволн через неоднородную межзвездную плазму.

Пример отклика источника мазерного излучения молекулы H_2O (диапазон 1.35 см) из обла-

сти звездообразования W51, полученный при наблюдении на радиоинтерферометре КРТ – 100-м радиотелескоп в Эффельсберге (Германия), представлен на рис. 7д (цветная вклейка). Наблюдения проводились 12 мая 2012 г., проекция базы наземно-космического интерферометра составила 14 500 км (1.14 диаметра Земли), что обеспечило на этой длине волны угловое разрешение в 80 мксек. дуги.

Наибольшее количество интерферометрических наблюдений было связано с изучением структуры ядер активных галактик. Для двух квазаров, ОJ 287 (с двойной черной дырой в центре, как предполагается некоторыми авторами – см., например, [67]) и VL Lacertae (прототип объектов класса лацертид), получены интерференционные отклики при наблюдениях в диапазоне 6.2 см с проекцией базы КРТ–Эффельсберг, равной $B = 7.2$ диаметра Земли, или 92 000 км. Это позволяет оценить величину яркостной температуры для доминирующей детали в излучении компактной струи – ядра: около или более 10^{13} К. Это больше, чем известный комптоновский предел [68] на яркостную температуру, но излучение все еще может объясняться в рамках стандартной модели некогерентного синхротронного излучения струи релятивистских электронов, усиленного за счет эффекта Доплера [69].

Для активной галактики 0716+714 – одного из самых быстропеременных внегалактических объектов – успешное детектирование интерференционных лепестков в том же диапазоне было выполнено для многих проекций баз, от примерно 1.5 до более 5 диаметров Земли. Международной рабочей группе по Ранней научной программе проекта “РадиоАстрон” удалось по этим данным восстановить изображение объекта (рис. 11) и измерить параметры видимого ядра. Ширина у основания струи в ядре объекта оказалась равной примерно 70 мксек. дуги или 0.3 пк, а яркостная температура – 2×10^{12} К. Заметим, что эти параметры измерены в момент минимума активности этого объекта.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космический радиотелескоп “РадиоАстрон” был выведен на расчетную орбиту, успешно испытан как в автономном режиме, так и в режиме наземно-космического интерферометра во всех четырех диапазонах длин волн (1.35, 6.2, 18 и 92 см). Определены основные параметры КРТ и интерферометра. В результате проведенных измерений реализовано рекордное угловое разрешение, которое в десятки раз лучше, чем достигнутое на Земле. Полученная на этапе летных испытаний чувствительность позволяет перейти к выполнению полномасштабной программы научных

исследований. Дальнейшие измерения позволяют уточнить предельные возможности по следующим направлениям: 1) определение предельного потока обнаружения линейно-поляризованного излучения, 2) использование эволюционных изменений орбиты для получения более полной информации о структуре объектов (в частности, для достижения сверхвысокого углового разрешения и вдоль, и поперек струй из активных ядер галактик), 3) использование техники и метода многочастотного синтеза изображений, 4) определение меры фарадеевского вращения плоскости поляризации при многочастотных наблюдениях, 5) исследование переменности структуры источника, 6) проведение высокоточных астрометрических измерений, 7) анализ перспектив высокоточного определения движения космического аппарата и др.

Краткая информация о текущих результатах регулярно сообщается в Информационных бюллетенях проекта “РадиоАстрон” [65].

Разработка и модернизация проекта “РадиоАстрон” проводились в течение многих лет. Мы считаем своим долгом выразить признательность за вклад в эту работу всем нашим коллегам, слишком многочисленным для упоминания здесь каждого из них в отдельности. Среди тех, кого мы особенно благодарим за поддержку и участие на ранних стадиях работ над проектом – Роальд Сагдеев, Виктор Трошин, Анатолий Трубников и Олег Андреев (ИКИ АН СССР), Сэнди Вайнреб (США), Жерар Мерш и Ван Клостер (Нидерланды), а за участие в проектировании и создании первых бортовых научных приемников в составе международной группы разработки приемников в 1985–1994 гг. – Ян Бойтер (Нидерланды), Сэм Вонгсовйото (Германия), Юрий Оношко и Тая Даунс (Австралия), Петри Юккала, Юха Маллат и Петри Пииронен (Финляндия).

Мы выражаем нашу благодарность научному и техническому персоналу обсерваторий САО РАН (Нижний Архыз, Россия) и Эффельсберг (Германия) за наземную поддержку антенных измерений параметров КРТ многочастотными наблюдениями квазиточечных переменных радиоисточников, а также персоналу обсерваторий, радиотелескопы которых участвовали в летных испытаниях по поиску интерферометрических лепестков, а именно: Квазар КВО – “Светлое”, “Зеленчукская”, “Бадары” (Россия), Евпатория (Украина), Эффельсберг (Германия), НРАО-GBT и Аресибо (США), Вестерборк (Нидерланды), Йебес (Испания), Медичина (Италия), Усуда (Япония). Последовавшие затем наблюдения в рамках Ранней научной программы включали в себя наблюдения КРТ как с некоторыми отдельными наземными телескопами, так и РСДБ-сетями Квазар КВО, EVN и LBA.

Мы благодарим за эту работу коллективы обсерваторий “Светлое”, “Зеленчукская” и “Бадары” (ИПА РАН, Россия), Евпатория (Украина), Эффельсберг (Германия), NRAO-GVT и Аресибо (США), Вестерборк (Нидерланды), Йебес и Робледо (Испания), Медичина и Ното (Италия), Усуда (Япония), Джодрел Бэнк (Великобритания), Онсала (Швеция), Шанхай и Урумчи (Китай), АТСА, Парк, Мопра, Хобарт, Тидбинбилла (Австралия), Хертвизтхоук (ЮАР), Ути (Индия).

Мы признательны также рецензенту за замечания, которые позволили улучшить статью, Л.С. Чесалину за помощь в отладке станции приема информации в Пушинской обсерватории, Е.П. Колесникову за ценные обсуждения вопросов электромагнитной совместимости научных приемников со служебными передатчиками КРТ при внеполосном приеме и результатов измерений основных параметров космического радиотелескопа, П.Г. Цыбулеву за обсуждение причин “шума телеметрии” и разработку программы KRTVIZ для визуализации наблюдений, Г.В. Липуновой за помощь в подготовке рисунков с результатами испытаний. Работы по Ранней научной программе проекта “РадиоАстрон” частично поддержаны программами фундаментальных исследований Президиума РАН (П-20 “Происхождение, строение и эволюция объектов Вселенной” и П-21 “Нестационарные явления в объектах Вселенной”) и Отделения физических наук РАН (ОФН-16 “Активные процессы и стохастические структуры во Вселенной” и ОФН-17 “Активные процессы в галактических и внегалактических объектах”), Министерством образования и науки в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (государственный контракт 16.740.11.0155; Соглашение 8405), грантами Российского фонда фундаментальных исследований 10-02-0076, 10-02-00147, 11-02-00368, 12-02-33101, Фондом некоммерческих программ “Династия”. Использувавшиеся при анализе антенных измерений наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 (САО РАН) были проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственные контракты 16.518.11.7062 и 14.518.11.7054). Европейская РСДБ-сеть (EVN) объединяет радиоастрономические институты Европы, Китая, ЮАР, России и других организаций, поддерживаемых национальными научными фондами. Национальная радиоастрономическая обсерватория США (NRAO/NRAO) является организацией Национального научного фонда США (NSF) и управляется Ассоциацией университетов (AUI).

ВОЗМОЖНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ 1.35 см

Измеренная эллиптичность главного лепестка диаграммы направленности КРТ по уровню половинной мощности может быть вызвана сравнительно большими фазовыми погрешностями по оси φ при сравнительно небольших искажениях по ортогональной к ней оси ϑ . Ортогональные азимутальные плоскости, соответствующие продольным сечениям главного лепестка диаграммы направленности КРТ с шириной $\vartheta_{0.5}$ и $\varphi_{0.5}$ лепестка по этим осям, будем обозначать “плоскостью 1” и “плоскостью 2”, а соответствующие им фазовые ошибки в раскрыве зеркала — $\delta\varphi_1$ и $\delta\varphi_2$. Главный лепесток диаграммы направленности радиотелескопа в плоскости 2 (вдоль оси φ), оказался в 2.2 раза шире, чем в плоскости 1, заметно асимметричным и несколько смещенным относительно расчетной геометрической оси КРТ, что характерно для искажений при комбинациях всех трех типов aberrаций — квадратичной, кубической и астигматизма.

Физически максимальные квадратичные и кубические фазовые ошибки в наземных радиотелескопах обычно означают расфокусировку излучения, отраженного от краев зеркала, при поперечных и продольных выносах облучателя из фокуса, и эти ошибки характерны даже для идеального параболоида с небольшим отношением фокуса F к диаметру D раскрыва зеркала ($F/D \approx 0.43$ для КРТ). В данном случае, полагая, что облучатель был установлен в расчетный геометрический фокус параболоида с проектной точностью (± 1 мм), эти погрешности могли появиться, например, вследствие того, что реальный фокус раскрывшегося зеркала не точно попал в свое проектное положение. Но возможны и другие причины, в том числе вызванные особенностями облучения зеркала (см. ниже).

Грубые количественные оценки дают для фазовой ошибки в плоскости 1 на краю зеркала (относительно центра раскрыва) $\delta\varphi_1 \approx 0$ (так как значение $\vartheta_{0.5}$ в пределах ошибок измерений близко к проектному значению для неискаженной диаграммы, см. параметры 1.10 и 2.10 в табл. 2), а для ошибки в плоскости 2 — значение порядка $\delta\varphi_2 \sim (2\pi/\lambda)R_0(\varphi_{0.5} - \vartheta_{0.5}) = 1.5\pi \text{ рад}^{10}$, где $\lambda = 1.35$ см — длина волны, $R_0 = 500$ см — радиус зеркала КРТ, $\varphi_{0.5} = 13'$ и $\vartheta_{0.5} = 6'$.

¹⁰ Оценки, которые можно получить по графикам в работах [51, 53], дают близкие значения: $\pi < \varphi_q < 2\pi$ для уширения главного лепестка диаграммы в $\approx (1.5-3)$ раза.

Отличие в эффективной площади можно количественно объяснить влиянием систематической ошибки в раскрыве зеркала $\varphi_q = \delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 \sim 1.5\pi$ и случайной ошибки с проектным значением $\sigma = 0.77$ мм, используя следующие известные формулы для коэффициентов η_σ и η_φ уменьшения эффективной площади в раскрыве антенны [43, 55]:

$$\eta_\sigma = \exp[-(4\pi\sigma/\lambda)^2], \quad (\text{A.1})$$

$$\eta_\varphi = 6.55(1.01 - 0.2 \cos \varphi_q)/(5.3 + \varphi_q^2). \quad (\text{A.2})$$

Отсюда $\eta_\sigma = 0.60$, $\eta_\varphi = 0.24$, $\eta = \eta_\sigma\eta_\varphi = 0.15$, и для эффективной площади A_0 , “исправленной” за эти потери, получим $A_0 = A_{eff}/\eta_\varphi = 31 \text{ м}^2$ и $A_0 = A_{eff}/\eta = 50 \text{ м}^2$ при $A_{eff} = 7.5 \text{ м}^2$. Значения A_0 подтверждают, что два рассмотренных типа погрешности могут быть основными причинами потерь A_{eff} и КИП (уменьшение КИП от 1 до 0.5–0.6 является типичным для однозеркальных антенн и определяется другими хорошо изученными факторами — прежде всего, переоблучением зеркала и падением облучения к его краям (зависит от диаграммы направленности облучателя) и ошибками поверхности зеркала — см., например, Приложение 5 в [43]). Отметим, что формула (A.2) получена при гауссовом распределении амплитуды по раскрыву и с облучением края раскрыва по уровню 0.1 [55], поэтому можно ожидать, что лучше применима для наших оценок, несмотря на то, что учитывает влияние только квадратичной фазовой ошибки, без кубической. Потерями площади из-за кубической фазовой ошибки (при абберациях типа комы) здесь пренебрегаем.

Формально объяснить уменьшение эффективной площади можно также с помощью только η_σ при среднеквадратичном отклонении $\sigma \approx 1.4$ мм. Тогда это значение σ можно было бы рассматривать как некоторое “эффективное значение” случайной ошибки. В данном случае разделить эти похожие эффекты на вклады от σ и φ_q удастся только “благодаря” наблюдаемой эллиптичности диаграммы направленности.

Наблюдаемый разброс (больше 10%) измеренных значений эффективной площади относительно среднего значения может быть вызван переменным значением случайных и систематических ошибок (σ и φ_q) из-за изменения распределения температуры на поверхности зеркала при изменении ориентации КРТ относительно Солнца. Так, из (A.1) следует, что уже при $\sigma \approx 0.77$ мм изменение σ даже на 0.1 мм может приводить к заметным вариациям эффективной площади КРТ в диапазоне 1.35 см. Столь сильная зависимость от случайной ошибки объясняется близостью рабочей центральной длины волны 1.35 см к так называемой “предельной длине волны радиотелескопа” λ_{min} , которая равна

$\lambda_{min} \approx (20-16)\sigma$ (согласно практическому критерию оценки этой предельной длины волны, [43]) и зависит от точности реализации рабочей поверхности зеркала, обычно — относительно идеальной параболической поверхности. Для КРТ имеем $\lambda/\sigma = 18$ при $\lambda = 13.5$ мм и проектном значении $\sigma = 0.77$ мм.

Следует подчеркнуть, что установить реальную однозначную физическую причину фазовых искажений в раскрыве антенны, разделив вклады на погрешности от зеркала, облучателя и геометрии антенно-фидерной системы, только по результатам измерений в летных испытаниях КРТ, без дополнительных данных или предположений, не представляется возможным. Можно лишь сказать, что они вызваны суммарной фазовой ошибкой в раскрыве из-за: 1) отличия реальной отражающей поверхности антенны от идеальной параболической поверхности, 2) погрешностей продольного и поперечного выноса облучателя из фокуса зеркала и 3) особенностей амплитудно-фазовой диаграммы направленности данного облучателя (в том числе, например, из-за разной ширины реальной амплитудной диаграммы направленности облучателя в ортогональных плоскостях, когда эффективная ширина облучения идеального зеркала в одной плоскости — проектная, а в другой — в два раза уже проектной; или из-за астигматизма облучателя, когда в одной плоскости фокус зеркала и центр фокусировки облучателя с астигматизмом близки друг к другу, а в другой плоскости существенно различаются).

Фазовое распределение поля $\varphi(x)$ в точке $0 \leq x \leq R_0$ раскрыва зеркала радиуса R_0 может быть записано в виде [54] $\varphi(x) = \Phi(x) - \Phi_0$, где $\Phi(x)$ и Φ_0 — начальные фазы поля в точке x и в середине раскрыва. При этом $\Phi(x) = \Psi(\psi) + k(\rho + t)$ и определяется фазовой диаграммой облучателя $\Psi(\psi)$ ($0 \leq \psi \leq \psi_0$; здесь ψ есть угол от фокуса зеркала между точками $x = 0$ и $x \leq R_0$) и длиной пути ρ от облучателя до зеркала и пути t от зеркала до раскрыва (k — волновое число). Поэтому $\Phi(x)$ есть функция фазовой диаграммы облучателя, профиля зеркала (с отклонением δ_3 поверхности от идеальной) и смещения фазового центра облучателя относительно фокуса параболоида (на δ_1 в продольном и на δ_2 в поперечном направлениях по отношению к оси антенны). Отклонение этих факторов от проектных вызывает суммарное отклонение $\delta\varphi(x)$ фазового распределения в раскрыве зеркала от проектного (в идеальном случае — близкого к синфазному) и с достаточной для нас точностью может быть оценено как [54]

$$\delta\varphi(x) = 2\delta\Psi(\psi) + k[\pm\delta_1(1 - \cos \psi) - \delta_2 \sin \psi - 2\delta_3(1 + \cos(\psi/2))]. \quad (\text{A.3})$$

Таблица 3. Моделирование фазовых погрешностей в антенной системе: три варианта вклада фазовых погрешностей облучателя [56] в потери эффективной площади A_{eff} и КИП, а также в эллиптичность поперечного сечения главного лепестка диаграммы направленности КРТ

Параметр	K(1.35 см)	C(6.2 см)	L(18 см)	P(92 см)
КРТ в полете, 2011–2012:				
1. $A_{eff}, \text{м}^2$	7.5	35	41	30
2. $\text{КИП} = A_{eff}/A_{geom}$	0.1	0.45	0.52	0.38
3. $\eta_\sigma = \eta_\sigma(\sigma = 0.77 \text{ мм})$	0.60	0.98	1.00	1.00
4. Вариант 1: $\varphi_q = 2\delta\Psi_{max}$.				
4.0 $\delta\Psi_{max}$ (в градусах фазы)	–100	–35	–35	–
4.1 φ_q (в градусах фазы)	–200	–70	–70	–
4.2 $\eta_\varphi = \eta_\varphi(\varphi_q)$	0.45	0.91	0.91	–
4.3 $\eta = \eta_\sigma\eta_\varphi$	0.27	0.89	0.91	–
4.4 $A_0 = A_{eff}/\eta, \text{м}^2$	28	39	45	–
4.5 $\text{КИП}_0 = A_0/A_{geom}$	0.35	0.50	0.57	–
5. Вариант 2: $\varphi_q = 2\delta\Psi_{max} + \delta\varphi_x$.				
$\delta_1 = 5.3 \text{ мм}$				
5.0 $\delta\varphi_x = k\delta_1/2$ (в градусах фазы)	–70	–15	–5	–
5.1 φ_q (в градусах фазы)	–270	–85	–75	–
5.2 $\eta_\varphi = \eta_\varphi(\varphi_q)$	0.24	0.87	0.89	–
5.3 $\eta = \eta_\sigma\eta_\varphi$	0.15	0.85	0.89	–
5.4 $A_0 = A_{eff}/\eta, \text{м}^2$	50	41	46	–
5.5 $\text{КИП}_0 = A_0/A_{geom}$	0.64	0.52	0.59	–
6. Вариант 3: $\varphi_q = \delta\varphi_1 + \delta\varphi_2$; $\delta\varphi_1 = \delta\Psi_{max} + k\delta_{11}/2 = 0$; $\delta\varphi_2 = \delta\Psi_{max} - k\delta_{12}/2 = -1.5\pi$;				
6.0 $\delta\varphi_x = k(\delta_{11} - \delta_{12})/2$ (в градусах фазы)	–70	–	–	–
6.1 φ_q (в градусах фазы)	–270	–	–	–
6.2 $\eta_\varphi = \eta_\varphi(\varphi_q)$	0.24	–	–	–
6.3 $\eta = \eta_\sigma\eta_\varphi$	0.15	–	–	–
6.4 $A_0 = A_{eff}/\eta, \text{м}^2$	50	–	–	–
6.5 $\text{КИП}_0 = A_0/A_{geom}$	0.64	–	–	–
6.6 $\delta_{11}, \text{мм}$	7.5	–	–	–
6.7 $\delta_{12}, \text{мм}$	13	–	–	–

Примечание. 1. Моделирование фазовых погрешностей в диапазоне 92 см не проводилось.

2. Коэффициенты потери площади обозначены $\eta = \eta_\sigma\eta_\varphi$, где η_σ характеризует потери на зеркале из-за случайных ошибок со среднеквадратичным отклонением σ , а η_φ – потери из-за систематических квадратичных погрешностей φ_q , вызванных, в основном, облучателем.

3. Вариант 1 модели: БАО в фокусе. Основная фазовая погрешность в раскрытии зеркала определяется: а) случайной погрешностью с проектным среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0.77 \text{ мм}$ поверхности зеркала от идеальной параболической и б) систематической квадратичной фазовой погрешностью с максимальным значением φ_q в раскрытии, обусловленной расчетной фазовой диаграммой направленности облучателя с погрешностью $\delta\Psi_{max}$ облучения краев антенны.

4. Вариант 2: БАО не в фокусе. К Варианту 1 добавляется небольшая квадратичная фазовая погрешность $\delta\varphi_x$ от продольного выноса облучателя из фокуса зеркала на 5 мм.

5. Вариант 3: астигматизм облучателя в диапазоне 1.35 см. Единный в Варианте 2 фазовый центр облучателя здесь для диапазона 1.35 см “расщепляется” на два эквивалентных фазовых центра, разнесенных на расстояние $\delta_{11} + \delta_{12}$ в ортогональных плоскостях. Точнее говоря, – на два “наилучших центра фокусировки в главных плоскостях”, так как понятие фазового центра относится к идеализированному синфазному случаю излучения сферической волны (по определению) [50, 51, 53], а в большинстве практических случаев фазовый фронт далек от синфазного. Дополнительная фазовая погрешность той же величины $\delta\varphi_x$ вызвана продольным выносом середины между этими центрами из фокуса зеркала.

Здесь, в общем случае, $\delta\Psi(\psi)$ содержит случайные и систематические отклонения фазы за счет фазовой диаграммы направленности облучателя, а член с δ_3 — за счет неточности поверхности зеркала, слагаемые с δ_1 и δ_2 отражают систематический “набег” фазы от середины раскрыва к краю из-за несовпадения фокуса зеркала с центром фокусировки облучателя (с четной и нечетной относительно середины раскрыва функциями, соответственно), $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число. Знак “+” перед δ_1 в (А.3) соответствует смещению δ_1 фазового центра облучателя из фокуса к зеркалу, а “-” — от зеркала.

Максимальное значение набег фазы достигает на краю раскрыва, при $\psi = \psi_0 = 60^\circ$ для КРТ. Отсюда, если можно пренебречь в (А.3) вкладом слагаемых с $\delta\Psi(\psi)$ и δ_3 , и полагая $k|\delta_2| \sin \psi_0 = \varphi_q \sim 1.5\pi$, получим грубую оценку для поперечного смещения $|\delta_2| \sim 12$ мм. Аналогично, полагая $k|\delta_1|(1 - \cos \psi_0) = \varphi_q$, получим оценку продольного смещения $|\delta_1| \sim 20$ мм и оценку максимального расстояния между фазовым центром облучателя и фокусом зеркала $\delta_{max} = (\delta_1^2 + \delta_2^2)^{1/2} \sim 23$ мм. С другой стороны, если основной вклад в (А.3) вносят фазовые искажения диаграммы направленности облучателя, то, полагая $2\delta\Psi(\psi_0) = \varphi_q \sim 1.5\pi$, получим оценку необходимой для этого максимальной фазовой погрешности облучения края зеркала $\delta\Psi(\psi = 60^\circ) \sim 0.75\pi = 135^\circ$.

Проведем оценки в простой модели фазовых погрешностей в антенно-фидерной системе (табл. 3), основываясь на данных расчета [56] амплитудно-фазовых диаграмм направленности облучателей КРТ и на проектном значении $\sigma = 0.77$ мм среднеквадратичной погрешности реализации параболической поверхности зеркала. Рассмотрим три варианта модели:

- 1) БАО в фокусе,
- 2) БАО не в фокусе,
- 3) БАО с астигматизмом в диапазоне 1.35 см.

В вариантах 1 и 2 астигматизмом пренебрегаем. Из данных [56] следует, что в каждом из диапазонов 1.35, 6.2 и 18 см:

1) фаза Φ_0 на оси диаграммы направленности изменяется с азимутальным углом α как $\Phi_0 \propto \alpha$, и в ортогональных плоскостях 1 и 2 сдвинута на $\pi/2$;

2) в каждой азимутальной плоскости фаза может быть аппроксимирована одинаковыми квадратичными уравнениями относительно оси диаграммы (центра зеркала) при максимальной погрешности облучения краев зеркала, равной $\delta\Psi_{max} \approx -100^\circ$ фазы в диапазоне 1.35 см и -35° фазы в диапазонах 6.2 и 18 см.

Отсюда получаем, что:

1) может иметь место астигматизм облучателя, в результате которого фазовый центр трансформируется в “фазовую линию” вдоль оси облучателя;

2) квадратичная фазовая погрешность облучения края зеркала в диапазоне 1.35 см (-100°) может быть близкой к той, которая требуется для объяснения измеренного значения эффективной площади ($\delta\Psi_{max} = \delta\Psi(\psi = 60^\circ) \approx -135^\circ$);

3) если бы облучатель имел единый фазовый центр и он совпадал с фокусом зеркала (тогда $\delta_1 = 0, \delta\varphi_x = 0$) или был сдвинут из фокуса от зеркала вдоль оси на расстоянии $\delta_1 = \delta\varphi_x/[k \cdot (1 - \cos 60^\circ)]$ (так, чтобы $\delta\varphi_x \approx -70^\circ$), то, согласно (А.3), фазовая погрешность в раскрыве $\delta\varphi_{max} = 2\delta\Psi_{max} + \delta\varphi_x$ будет $\delta\varphi_{max} \sim -200^\circ$ или $\delta\varphi_{max} \sim -270^\circ$, и соответствующие коэффициенты потерь эффективной площади составят $\eta \sim 0.27$ или $\eta \sim 0.15$ (см. подробнее варианты 1 и 2 в табл. 3).

Таким образом, имеющее место *уменьшение площади* в диапазоне 1.35 см (дополнительно к ее проектному уменьшению из-за $\sigma \neq 0$) может почти полностью определяться расчетными значениями квадратичных фазовых искажений диаграммы направленности облучателя КРТ по данным [56].

Однако при этом в обоих вариантах квадратичные фазовые ошибки в плоскостях 1 и 2 оказываются одинаковыми и большими. Это означает, что таким образом можно объяснить увеличение ширины главного лепестка диаграммы направленности, но не его эллиптичность.

Вариант 3 модели решает и проблему эллиптичности. Для упрощения примем, что реальный астигматизм облучателя может быть описан в приближении двух центров фокусировки облучателя (центры 1 и 2 в плоскостях 1 и 2, соответственно), смещенных вдоль фокальной оси в разные стороны от фокуса зеркала на расстояния δ_{11} (центр 1, к зеркалу) и δ_{12} (центр 2, от зеркала). Тогда, используя (А.3), фазовые погрешности в плоскостях 1 и 2 будут $\delta\varphi_1 = \delta\Psi_{max} + k\delta_{11}c$ и $\delta\varphi_2 = \delta\Psi_{max} - k\delta_{12}c$, где $c = (1 - \cos 60^\circ) = 1/2$, а полная фазовая погрешность в раскрыве равна $\varphi_q = \delta\varphi_1 + \delta\varphi_2 = 2\delta\Psi_{max} + (\delta_{11} - \delta_{12})\pi/\lambda$.

Отсюда, полагая $\Psi_{max} = -100^\circ, \delta\varphi_1 = 0$ и $\delta\varphi_2 = -1.5\pi$, окончательно получим согласованные оценки фазовых искажений, необходимых для объяснения как измеренных значений эффективной площади, так и эллиптичности диаграммы направленности КРТ, и соответствующих сдвигам центров 1 и 2 фокусировки облучателя в разные стороны от фокуса зеркала: $\varphi_q = -1.5\pi, \delta_{11} = 7.5$ мм и $\delta_{12} = 13$ мм (табл. 3). При этом расстояние между этими центрами равно $b = \delta_{11} + \delta_{12} \sim 20$ мм, а вынос общего эквивалентного центра фокусировки из фокуса зеркала будет $\Delta x = (\delta_{11} - \delta_{12})/2 \sim -3$ мм (в сторону от зеркала) —

Рис. 4. (цветная вклейка). (а) — Испытания высокоточных углепластиковых панелей рефлектора радиотелескопа в Научно-техническом центре Европейского космического агентства в 1994 г. (Нордвэйк, Нидерланды); (б) — испытания модели космического радиотелескопа и интерферометра в Пушинской обсерватории АКЦ ФИАН, 2003–2004 гг.; (в, г) — заключительные наземные испытания КРТ с модулем “Навигатор” проходили в НПО им. С.А. Лавочкина вплоть до транспортировки на космодром, (г) — антенна КРТ в сложенном состоянии, видны также 1.5-м рефлектор антенны радиоканала ВИРК и панели солнечных батарей; (д) — памятная пластина с портретом первого радиоастронома Грота Ребера (1911–2002), установленная на КРТ; (е) — изображение КРТ, логотипы организаций и флаги стран — участников проекта “РадиоАстрон” на обтекателе ракеты комплекса “Зенит-3Ф”; (ж–и) — вывоз ракеты-носителя с КА “Спектр-Р” и разгонным блоком “Фрегат” на стартовую позицию площадки № 45 космодрома “Байконур”; (к, л) — Старт, состоявшийся 18 июля 2011 г. в 5 часов 31 минуту 17.91 секунды Московского декретного времени; (м) — рисунок космического радиотелескопа, успешно раскрытого 23 июля 2011 г. на орбите.

Рис. 7. (цветная вклейка). (а) — Радиометрические отклики телескопа в первом наблюдении радиоисточника Кассиопея-А с КРТ в полете: 27 сентября 2011 г., диапазоны 92 и 18 см, каналы левой и правой поляризации. Два скана слева сделаны в одном сечении источника (в прямом и обратном направлениях), два скана справа — в перпендикулярном к нему сечении, средний отклик — сечение края объекта в процессе перестановки антенны. Короткие импульсы — отклики на включение калибровочных сигналов от приемников. (б) — Пример радиометрических откликов КРТ на источник при сканировании участка неба с Крабовидной туманностью в двух диапазонах одновременно — 1.35 см (в обеих поляризациях) и 6.2 см (в одной поляризации) — по наблюдениям с КРТ в режиме одиночного телескопа 17 октября 2011 г. (в) — Первый сигнал, полученный в АКЦ ФИАН от радиоинтерферометра “Космос–Земля” в диапазоне 18 см по наблюдениям квазара 0212+735 на КРТ и на 100-м радиотелескопе Эффельсберг (Германия) 15 ноября 2011 г. (г) — Интерференционный отклик (в единицах отношения сигнала к шуму) по наблюдениям квазара OJ287 6 апреля 2012 г. в диапазоне 6.2 см наземно-космическим интерферометром. Проекция базы КРТ–Эффельсберг на картинную плоскость составила $B = 7.2$ диаметра Земли. (д) — Отклик интерферометра при наблюдениях узких спектральных линий молекул воды в диапазоне 1.35 см в объектах с мазерным механизмом излучения в области звездообразования W51, полученный при наблюдениях КРТ с телескопом Эффельсберг 12 мая 2012 г. Проекция базы B интерферометра на картинную плоскость равна $B = 1.14$ диаметра Земли (14500 км). Угловое разрешение около 0.0002 угл. сек. Время накопления сигнала 120 с. По вертикальной оси отложена величина коррелированного отклика излучения (коэффициент корреляции), в зависимости от частоты наблюдения спектральной детали и частоты интерференции. (е) — Четырехантенные радиоинтерферометрические наблюдения одиночного импульса от пульсара PSR B0950+08 между КРТ и радиотелескопами Аресибо (Пуэрто-Рико, США), Вестерборк (Нидерланды) и Эффельсберг (Германия) 25 января 2012 г. Проекция базы интерферометра 220000 км. (ж) — То же, что на предыдущем графике, но при накоплении длинной последовательности импульсов. Хорошо видно изменение сигнала во времени — в течение часа.

из-за асимметрии расположения центров 1 и 2 относительно фокуса.

Так как наличие заметной асимметрии формы главного лепестка диаграммы направленности в плоскости 2 (где ширина лепестка больше) требует вклада аббераций типа комы, то можно предположить и присутствие поперечного смещения одного из фазовых центров облучателя относительно фокальной оси антенны с максимальной кубической погрешностью $\sim \pi/2$. Для более точного вывода о причинах наблюдаемых особенностей требуется строгий расчет и сравнительный анализ основных возможных вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. И. Матвеевко, Н. С. Кардашев, Г. Б. Шоломицкий, *Радиофизика* **8**, 652 (1965).
2. Н. С. Кардашев, Ю. Н. Парийский, Н. Д. Умарбаева, *Астрофизическое исследование*, **5**, 16 (1973).
3. В. И. Буякас, А. С. Гвамичава, Л. А. Горшков, Г. А. Долгополов, Ю. И. Данилов, М. Б. Заксон, Н. С. Кардашев, В. В. Климашин, В. И. Комаров, Н. П. Мельников, Г. С. Нариманов, О. Ф. Прилуцкий, А. С. Пшеников, В. Г. Родин, В. А. Рудаков, А. И. Савин, Р. З. Сагдеев, Ю. П. Семенов, А. Г. Соколов, В. И. Усюкин, К. П. Феоктистов, Г. С. Царевский, И. С. Шкловский, *Космич. исслед.* **XVI**, 767 (1978).
4. N. W. Broten, T. H. Legg, J. L. Locke, *et al.*, *Science* **156**, 1592 (1967).
5. C. Vare, B. G. Clark, K. I. Kellermann, *et al.*, *Science* **157**, 189 (1967).
6. K. I. Kellermann, B. G. Clark, C. C. Vare, *et al.*, *Astrophys. J. (Lett.)* **153**, L209 (1968).
7. J. Gubbay, A. J. Legg, D. S. Robertson, *et al.*, *Nature* **222**, 730 (1969).
8. K. I. Kellermann, D. L. Jauncey, M. H. Cohen, *et al.* *Astrophys. J.* **169**, 1 (1971).
9. Д. Д. Бродерик, В. В. Виткевич, Д. Л. Джонси и др., *Астрон. журн.* **47**, 784 (1970).
10. Л. И. Матвеевко, *История РСДБ — становление и развитие*, Сообщ. ИПА РАН № 176 (С.-Петербург: изд. Ин-та прикл. астрон. РАН, 2007).
11. T. J. Pearson and A. C. S. Readhead, *Astrophys. J.* **328**, 114 (1988).
12. Y. Y. Kovalev, K. I. Kellermann, M. L. Lister, *et al.*, *Astron. J.* **130**, 2473 (2005).
13. Н. С. Кардашев, Ю. Н. Парийский, А. Г. Соколов, *Усп. физ. наук* **104**, 328 (1971).
14. М. Б. Заксон, Н. С. Кардашев, А. И. Савин, и др., *Земля и Вселенная* № 4, 2 (1980).

15. В. М. Арсентьев, В. И. Бержатый, В. А. Благов и др., Докл. АН СССР **264**, 588 (1982).
16. *Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН*, <http://www.asc.rssi.ru/>.
17. G. S. Levy, R. P. Linfield, C. D. Edwards, *et al.*, *Astrophys. J.* **336**, 1098 (1989).
18. R. P. Linfield, G. S. Levy, C. D. Edwards, *et al.*, *Astrophys. J.* **358**, 350 (1990).
19. H. Hirabayashi, H. Hirose, H. Kobayashi, *et al.*, *Science* **281**, 1825 (1998).
20. H. Hirabayashi, H. Hirose, H. Kobayashi, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **52**, 955 (2000).
21. В.В. Хартов, Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина” № 3, 3 (2011).
22. Н. С. Кардашев, Ю. А. Александров, В. В. Андреев и др., Вестн. ФГУП “НПО им. С. А. Лавочкина” № 3, 11 (2011).
23. Н.С. Кардашев, Ю.А. Александров, В. В. Андреев и др., Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина” № 3, 19 (2011).
24. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”, <http://www.laspace.ru/>.
25. *RadioAstron User Handbook*, <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf>.
26. В. Ю. Авдеев, А. В. Алакоз, Ю. А. Александров и др., Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина” № 3, 4 (2012).
27. Г. Н. Застенкер, Л. М. Зеленый, А. А. Петрукович и др., Вестн. ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”, № 3, 22 (2012).
28. Yu. A. Aleksandrov, A. N. Kotik, N. V. Myshonkova, and S. D. Fedorchuk, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagkesamansky (Cambridge: Cambridge Sc. Publishers, 2007), p. 69.
29. I. S. Vinogradov, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagkesamansky (Cambridge: Cambridge Sc. Publishers, 2007), p. 49.
30. V. V. Andreyanov, L. I. Gurvits, N. S. Kardashev, *et al.*, in: *Proc. of the Workshop “Quasat a VLBI observatory in space”*, ESA SP-213 (Europ. Space Agency, 1984), p. 161.
31. V. V. Andreyanov, A. V. Biriukov, V. I. Vasil'kov, *et al.*, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagkesamansky (Cambridge: Cambridge Sc. Publishers, 2007), p. 17.
32. R. F.C. Vessot, M. V. Levine, E. M. Mattison, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 2081 (1980).
33. P. Waller, F. Gonzalez, J. Hahn, *at al.*, in: *Proc. of the 40th Annual precise time and time interval (PTTI) meeting* (Reston, Virginia, USA, 2009), p. 69.
34. A. V. Biriukov, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagkesamansky (Cambridge: Cambridge Sc. Publishers, 2007), p. 57.
35. N. S. Kardashev, B. V. Kreisman, and Yu. N. Ponomarev, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagkesamansky (Cambridge: Cambridge Sc. Publishers, 2007), p. 3.
36. R. J. Eanes, B. Schutz and B. Tepley, in: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Earth Tides* (Stuttgart: E. Schweizerbart'sche VerlagBuchhandlung, 1983), p. 239.
37. W. M. Folkner, J. G. Williams and D. H. Boggs, *The planetary and lunar ephemeris DE-421. JPL Memorandum IOM 343R08003*, ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets/ioms/de421_moon_coord_iom.pdf (2008).
38. F. G. Lemoine, S. C. Kenyon, J. K. Factor, *et al.*, *The development of the joint NASA GSFC and the National imagery and mapping agency geopotential model egm96*, NASA, http://bowie.gsfc.nasa.gov/697/staff/lemoine/EGM96_NASA-TP-1998-206861.pdf (1998).
39. D. A. Duev, C. G. Molera, S. V. Pogrebenko, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **541**, A43 (2012).
40. М. В. Сажин, В. Ю. Власов О. С. Сажина, В. Г. Турьшев, *Астрон. журн.* **87**, 1043 (2010).
41. И. Е. Молотов, В. М. Агапов, В. В. Куприянов и др., *Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулковке* **219**, вып. 1, 239 (2009).
42. *IAU Minor Planet Center*, <http://www.minorplanet-center.net/iau/DASO/DASO.html>.
43. Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский, *Радиотелескопы и радиометры* (М.: Наука, 1973).
44. А. Р. Томпсон, Дж. М. Моран, Дж. У. Свенсон, *Интерферометрия и синтез в радиоастрономии*, пер. с англ. (М.: Физматлит, 2003).
45. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Yu. A. Kovalev, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **139**, 545 (1999).
46. Ю. А. Ковалев, В. И. Васильков, А. В. Бирюков, Н. Я. Николаев, в сб.: *Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции* (Нижний Архыз: изд. САО РАН, 2010), с. 32.
47. *Отчет о радиоастрономических испытаниях КРТ на полигоне в Пушино* (М.: АКЦ ФИАН, 2004).
48. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
49. *Институт радиоастрономии им. Макса Планка (MPIFR, Bonn, Germany)*, <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/div/vlbi/igamma/results.html>.
50. *Сканирующие антенные системы СВЧ*, в 3-х томах, т. 1, пер. с англ. (М.: Сов. радио, 1966).
51. Г. З. Айзенберг, *Антенны УКВ* (М.: Связь, 1957, 1977).
52. У. Христиансен, И. Хегбом, *Радиотелескопы* (М.: Мир, 1972).
53. Г. К. Галимов, *Рефлекторные сканирующие антенны*, т. 2 (М.: “Авансес Солюшнз”, 2010).
54. Ю. В. Шубарин, *Антенны сверхвысоких частот* (Харьков: Изд-во Харьковск. ун-та, 1960).
55. А. М. Цейтлин, *Антенная техника и радиоастрономия* (М.: Сов. радио, 1976).
56. *Численный расчет диаграмм направленности БАО КРТ в диапазонах 1.35, 6.2 и 18 см*, дополнение к проектной документации (М.: АКЦ ФИАН, 2012).

57. А. Д. Кузьмин, А. Е. Саломонович, *Радиоастрономические методы измерения параметров антенн* (М.: Сов. радио, 1964).
58. K. Hachisuka, A. Brunthaler, K. M. Menten, *et al.*, *Astrophys. J.* **645**, 337 (2006).
59. T. Hirota, T. Bushimata, Y. K. Choi, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 897 (2007).
60. T. Shimoikura, H. Kobayashi, T. Omadaka, *et al.*, *Astrophys. J.* **634**, 459 (2005).
61. A. Tolmachev, *Astron. Tel. No.* 3177 (2011).
62. E. E. Bloemhof, M. J. Reid, and J. M. Moran, *Astrophys. J.* **397**, 500 (1992).
63. K. G. Belousov and S. F. Likhachev, in: *Radioastronomical Tools and Techniques*, eds N. S. Kardashev, R. D. Dagesamansky (Cambridge: Cambridge Sc. Publishers, 2007), p. 95.
64. A. R. Whitney, *ASP Conf. Ser.* **306**, 123 (2003).
65. *Информационный бюллетень проекта "РадиоАстрон"*, http://www.asc.rssi.ru/radioastron/news/news_rus.html.
66. A. Wolszczan and J. M. Cordes, *Astrophys. J. (Letters)* **320**, L35 (1987).
67. M. J. Valtonen, H. J. Lehto, L. O. Takalo, and A. Sillanää, *Astrophys. J.* **729**, 33 (2011).
68. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, *Astrophys. J. Lett.* **155**, 71 (1969).
69. M. H. Cohen, M. L. Lister, D. C. Homan, *et al.*, *Astrophys. J.* **658**, 232 (2007).



Рис. 4 (а–м).

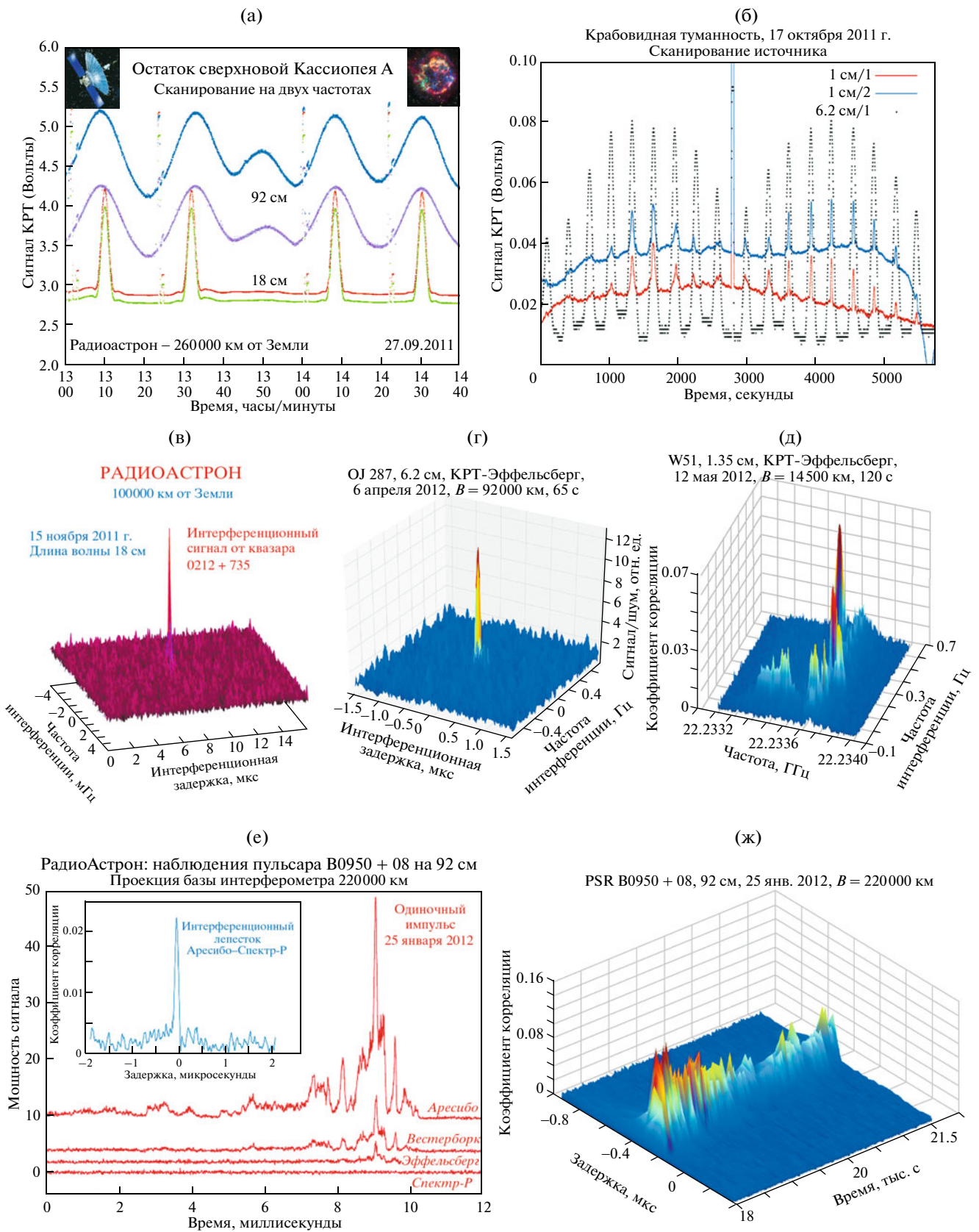


Рис. 7 (а–ж).