

## **Технические решения и практика эксплуатации приборного комплекса космического телескопа наземно-космического радиointерферометра «РадиоАстрон»**

© Н. С. Кардашев<sup>1</sup>, К. Г. Белоусов<sup>1</sup>, А. В. Бирюков<sup>1</sup>,  
В. И. Васильков<sup>1</sup>, Б. З. Каневский<sup>1</sup>, Ю. А. Ковалев<sup>1</sup>,  
Ю. Ю. Ковалев<sup>1</sup>, А. В. Коваленко<sup>2</sup>, В. Н. Лукаш<sup>1</sup>,  
Б. С. Новиков<sup>3,1</sup>, А. И. Смирнов<sup>1</sup>, С. Д. Федорчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ПРАО АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Проект наземно-космического интерферометра «РадиоАстрон» предназначен для изучения многочастотной структуры различных космических радиоисточников (квазаров, ядер галактик, мазерных источников, пульсаров) со сверхвысоким угловым разрешением в дециметровом и сантиметровом диапазонах радиоволн.

В результате проведенной работы к настоящему времени достигнуто рекордное угловое разрешение в 8 мкс дуги на длине волны 1.35 см. Заложенное в техническом задании время 3-летнего активного существования космического радиотелескопа (КРТ) превышено более чем в два раза. Создана наземно-космическая радиointерферометрическая обсерватория «РадиоАстрон». Благодаря эффективной совместной работе КРТ на спутнике «Спектр-Р» и более 60 наземных телескопов в составе обсерватории получены новые уникальные научные результаты, которые невозможно было достичь ранее с использованием наземных инструментов. В статье приводятся и обсуждаются основные технические характеристики и состояние КРТ в полете после 7 лет его эксплуатации на длинах волн 1.35, 6.2, 18 и 92 см.

**Ключевые слова:** наземно-космический радиointерферометр, РСДБ, Спектр-Р, космический радиотелескоп, «РадиоАстрон», параметры антенны, бортовой комплекс аппаратуры, системы регистрации, бортовой активный водородный стандарт частоты.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.47.31-37>

### **Введение**

Принципиальная возможность создания радиointерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ) впервые была показана еще в 1965 г. [1]. При этом на тот момент существовали три следующие главные проблемы: 1) обеспечение высокой стабильности гетеродинов в супергетеродинных приемниках на каждом РСДБ-пункте; 2) реализация независимой синхронизированной регистрации данных на промежуточной (видео) частоте в максимально воз-

можной полосе частот; 3) вопрос технической возможности обработки больших массивов РСДБ-данных за не слишком большое время после их доставки в единый центр обработки. Тем не менее задача была настолько актуальна и многообещающа, в том числе из-за потенциального применения РСДБ не только в радиоастрономии, что уже через два года были выполнены первые успешные РСДБ-эксперименты в 1967 г. в Канаде и США. Первые трансконтинентальные РСДБ были реализованы между США и Швецией в 1968–1969 гг., между США и Австралией — в 1969–1971 гг. Важную роль сыграли совместные РСДБ-наблюдения в 1969 г. на 43-метровом телескопе в Грин-Бэнке (США) и 22-метровом — в Симеизе (СССР) [2–3]. Казалось, еще немного — и астрономическое сообщество создаст глобальный радиотелескоп из РСДБ-сети телескопов, «раскиданных» по всему земному шару [4], с набором баз от минимального до диаметра Земли  $D$  и угловым разрешением до  $\lambda/D$ , где  $\lambda$  — длина волны. Уже в 1970 г. Академией наук СССР обсуждалась возможность создания наземно-космического РСДБ. В 1980 г. принимается Постановление Правительства СССР о соответствующих разработках, включая работы по наземно-космическому РСДБ-проекту «РадиоАстрон». К 1985 г. формируется международная группа из Австралии, Германии, Нидерландов, Финляндии, Индии и СССР для разработки бортовых научных приемников, и в 1990 г. поступают первые экземпляры бортовых приемников. По ряду причин спутник «Спектр-Р» с космическим телескопом «РадиоАстрон» на борту запускается через 20 лет — 18 июля 2011 г. Он успешно функционирует вплоть до настоящего момента. Первые успешные космические РСДБ были реализованы на геостационарном спутнике TDRSS (1986–1988 гг., США, параболическая антенна диаметром 5 м, диапазоны 2 и 13 см) и спутнике HALCA (1997–2003 гг., Япония, проект VSOP, сетчатая антенна диаметром 8 м, диапазоны 6 и 18 см, удаление от центра Земли — 28 тыс. км). Этот опыт был учтен при подготовке проекта «РадиоАстрон» [2].

## **Основные инженерно-технические идеи и решения**

Надежное функционирование обсерватории «Спектр-Р» с космическим радиотелескопом в течение 7 лет полета подтвердило правильность основных инженерно-технических идей и решений, на которых базируется проект [3]:

1. Технология создания 10-метрового трансформируемого космического зеркала радиотелескопа с высокоточной формой поверхности и высокоточной системой ориентации, наведения и сопровождения (НПО им. С. А. Лавочкина (НПОЛ), Московское опытно-конструкторское бюро «Марс»);

2. Создание уникального приемного комплекса, работающего в четырех диапазонах частот с совмещенным облучателем в двух поляризационных каналах и с системой обеспечения теплового режима пассивного охлаждения СОТР [Австралия: приемник диапазона 18 см — Космическое агентство Австралии (Australian Space Office), Научная и промышленная исследовательская корпорация Содружества (CSIRO), компании Бритиш Аэроспейс (British Aerospace Ltd, Adelaide) и Майтек (Mitec Ltd, Brisbane); Индия: МШУ диапазона 92 см — Национальный центр радиоастрономии, Институт фундаментальных исследований Тата (NCRA TIFR, Poona University Campus); Россия: совмещенный блок

антенных облучателей с ортогональными круговыми поляризаторами диапазонов 1.35–92 см и приемники диапазонов 1.35 и 6 см — СКБ Института радиотехники и электроники РАН, приемник диапазона 92 см — НИИ «Горизонт», СОТР и Технические задания — НПОЛ, АКЦ ФИАН; США: МШУ диапазона 1.35 см — Национальная радиоастрономическая обсерватория (NRAO, Green Bank)];

3. Разработка, создание и многолетняя эксплуатация первого в мире бортового активного водородного стандарта частоты, позволившего увеличить время эффективного накопления сигнала (ЗАО «Время Ч»);

4. Реализация широкополосной радиолинии передачи на Землю РСДБ-информации со скоростью 144 Мб/с через остронаправленную антенну высокоинформативного радиоконкомплекса, ВИРК (ОАО «Ракетно-космические системы», НПОЛ);

5. Организация орбитальных измерений, обеспечивающих высокоточное определение траектории космического аппарата (как предсказание, так и реконструкция) и позволяющих увеличить время накопления сигнала (Институт прикладной математики РАН);

6. Разработка, создание и 7-летняя эксплуатация двух станций приема РСДБ-информации в Пушино и Грин-Бэнке с оригинальной российской системой регистрации научных данных (АКЦ ФИАН);

7. Создание в АКЦ ФИАН российского коррелятора научных данных;

8. Организация управления научными РСДБ-экспериментами, требующего обеспечения синхронного функционирования КРТ с многочисленными наземными радиотелескопами (НПОЛ, АКЦ ФИАН).

## **Практика эксплуатации КРТ**

### *Базовая информация*

1. Космический радиотелескоп: диаметр 10 м, состоит из 27 лепестков и центрального сплошного зеркала диаметром 3 м, запущен 18 июля 2011 г.

2. Диапазоны частот: 0.32, 1.6, 4.8 и 22 (18–25) ГГц.

3. Наивысшее разрешение (диапазон 1.3 см): 8 мкс дуги.

4. Орбита: перигей 1–50 тыс. км, апогей 330–360 тыс. км, период обращения вокруг Земли 9–10 сут, орбита эволюционирующая.

5. Пять методов определения параметров орбиты, включая эффект Доплера, оптические и лазерные измерения и РСДБ.

6. Требования на точность восстановления орбиты: расстояние до 500 м, скорость до 2 см/с.

7. Ожидаемое время жизни: 5 лет (время гарантированного существования — 3 года).

8. Станции управления полетом: Уссурийск, Медвежье озеро.

9. Станции слежения и приема РСДБ-информации по каналу ВИРК: Пушино (Россия), Green Bank (США).

10. Скорость потока научных данных с КРТ: 128 Мбит/с (144 Мбит/с — с кодами контроля).

11. Два основных метода частотной синхронизации: по бортовому (незамкнутая петля) и наземному (замкнутая петля) водородным стандартам.

12. Программные корреляторы для обработки данных: АКЦ, DiFX Bonn, JIVE SFXC.

### *Технические достижения*

1. Впервые в космосе реализованы и работают:
  - жесткая зеркальная антенна диаметром 10 м, самый крупный космический телескоп и самая крупная космическая конструкция (7 лет);
  - активный водородный стандарт частоты — около 7 лет непрерывной работы на орбите.
2. Впервые реализован наземно-космический интерферометр на длинах волн 92 см и 1.3 см.
3. Широкополосная передача данных с расстояний Земля-Луна: 144 Мбит/с.
4. Впервые проведены поляризационные наземно-космические измерения.
5. Впервые работают самый длинноволновый и коротковолновый диапазоны: 92 и 1.3 см.
6. Самая большая наземно-космическая база.
7. Рекорд углового разрешения в 7–8 мкс дуги в диапазоне 1.35 см.

### *Основные антенные параметры КРТ в полете*

Эффективная площадь — проектная в диапазонах 92, 18 и 6.2 см, но в 3 раза меньше проектной на  $\lambda = 1.35$  см, которая близка к минимальной длине волны использования телескопа [5]. Эквивалентная температура собственных шумов системы — проектная в диапазонах 92, 18 и 1.35 см, но в 2 раза больше проектной на длине волны 6.2 см. Эквивалентная спектральная плотность потока излучения системы (SEFD) — проектная в диапазонах 92 и 18 см, но в 2 раза больше проектной на длине волны 6.2 см и в 3 — на длине волны 1.35 см. Чувствительность наземно-космического двухэлементного РСДБ — проектная и лучше проектной в диапазонах 92 и 18 см (лучше из-за реализации большего времени накопления сигнала), но на длинах волн 6.2 см и 1.35 см — в 1.5 и 2 раза хуже проектной соответственно. Однако реализация больших времен накопления сигнала улучшила чувствительность на 6.2 и 1.35 см и практически привела ее к значениям, близким к проектным. Поэтому оставшиеся небольшие отличия чувствительности от проектных значений несущественно повлияли на выполнение научной летной программы [5].

Продолжается периодический мониторинг антенных параметров КРТ с использованием как специальных калибровочных («юстировочных») сеансов, так и РСДБ-наблюдений. Обнаружена переменность некоторых параметров с периодом, близким к периоду орбитального движения. Моделирование показало заметное влияние штатных изменений физических температур элементов антенно-фидерного тракта на переменность собственных шумов системы, однако средние значения основных антенных параметров остаются стабильными в пределах погрешности 10–15 %.

### *Современное состояние*

1. Наблюдения проводятся в течение 7 лет в диапазонах 92, 18, 6 и 1.3 см (с двумя круговыми поляризациями) до баз в 350 тыс. км. Данные обрабатываются на корреляторе в АКЦ ФИАН, куда по-прежнему поступают результаты

с КРТ от станций приема РСДБ информации в Пушино и Грин-Бэнке и от наземных телескопов, участвующих в эксперименте.

2. За 7 лет проведено 4500 сеансов РСДБ-наблюдений и 298 сеансов наблюдений калибровочных астрономических объектов.

3. Антенна КРТ и бортовой комплекс научной аппаратуры работают в штатном режиме. Наблюдается некоторый износ аппаратуры, однако это пока не сказывается негативно на возможности реализовывать научную программу в полном объеме.

3.1. Водородный стандарт частоты завершил свою работу — закончился запас рабочего тела (водорода) — в 2018 г. перешли на синхронизацию с Земли по замкнутой петле.

3.2. После нескольких отказов и их самоустранений, с весны 2018 г. снижено количество наблюдений в 1-ом поляризованном канале приемника на длину волны 18 см. С каналом 2 в диапазоне 18 см наблюдения продолжают в штатном режиме. Предполагаемая причина — влияние космических лучей на маломощный усилитель — 18 см, канал 1, расположенный на холодной плите в открытом космосе.

4. Обнаружен дрейф мощности одного из генераторов шумового сигнала приемника диапазона 1.35 см, около 5 % в год, который после его учета практически не сказывается на штатной работе.

5. Коррекция орбиты успешно проведена 17 июля 2017 г.

6. По решению Роскосмоса работа с космическим аппаратом «Спектр-Р» продлена до конца 2019 г.

## **Заключение**

На основании выполненного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Надежное функционирование обсерватории «Спектр-Р» с космическим радиотелескопом в течение первых 7 лет полета подтвердило правильность основных инженерно-технических идей и решений, на которых базируется проект «РадиоАстрон».

2. К основным техническим достижениям проекта можно отнести следующие результаты:

— впервые в космосе реализованы и успешно работают:

- самый крупный космический телескоп с жесткой параболической поверхностью диаметром 10 м;
- наземно-космический интерферометр на самой длинной и самой короткой длинах волн 92 и 1.3 см;
- активный водородный стандарт частоты (2011–2018 гг.);
- система широкополосной передачи больших объемов информации на расстояниях Земля — Луна (до 360 тыс. км) со скоростью 144 Мбит в сек.

— впервые выполнены поляризационные наземно-космические измерения;

— проведены работы на самой большой наземно-космической базе между антеннами;

— достигнуто рекордное угловое разрешение в 8 мкс.

3. Благодаря эффективной совместной работе космического радиотелескопа на спутнике «Спектр-Р» со многими наземными телескопами фактически создана наземно-космическая радиоинтерферометрическая обсерватория (глобальный наземно-космический телескоп [4]) и достигнуты новые результаты, которые не могли быть получены только наземными средствами.

## Л и т е р а т у р а

1. Матвеевко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. // Радиофизика. — 1965. — Т. 8. — С. 652.

2. Кардашев Н. С., Хартов В. В., Абрамов В. В. и др. «РадиоАстрон» — телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрон. журн. — 2013. — Т. 90, № 3. — С. 179–222.

3. Астрокосмический центр ФИАН, РадиоАстрон [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/publications/publ.html>.

4. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973. — 416 с.

5. Ковалев Ю. А., Васильков В. И., Попов М. В. и др. Проект «РадиоАстрон». Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011–2013 гг. // Космич. исслед. — 2014. — Т. 52, № 5. — С. 430–439.

# **“RadioAstron” Space Radio Telescope and Interferometer: Technical Solutions and Operational Experience**

**N. S. Kardashev, K. G. Belousov, A. V. Biryukov, V. I. Vasilkov,  
B. Z. Kanevsky, Yu. A. Kovalev, Y. Y. Kovalev, A. V. Kovalenko,  
V. N. Lukash, B. S. Novikov, A. I. Smirnov, S. D. Fedorchuk**

The RadioAstron ground-to-space interferometer project is designed to study the multi-frequency structure of various cosmic radio sources such as quasars, galactic nuclei, maser sources, and pulsars with ultra-high angular resolution in decimeter and centimeter radio waves. Nowadays a record angular resolution of  $8 \mu\text{as}$  at a wavelength of 1.35 cm is reached. The 3-year active existence of the space radio telescope (SRT) laid down in the technical specification exceeded more than twice. A ground-space radio interferometric observatory RadioAstron was created. Thanks to the effective joint work of the SRT and more than 60 ground-based telescopes as a part of the observatory, new unique scientific results were obtained. We could not achieved it using ground-based instruments only. The article presents and discusses the main technical characteristics of the SRT in flight after 7 years of its operation at wavelengths of 1.35, 6.2, 18 and 92 cm.

**Keywords:** ground-space VLBI, “Spectr-R”, space radio telescope, RadioAstron, antenna parameters, on-board science complex, data acquisition and recording system, on-board active hydrogen maser.