

УДК 629.78:522.59

## РАДИОАСТРОН (ПРОЕКТ «СПЕКТР-Р») – РАДИОТЕЛЕСКОП МНОГО БОЛЬШЕ ЗЕМЛИ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ИСПЫТАНИЯ

*Ю.А.Александров\**, *В.В. Андреянов\**, *Н.Г.Бабакин\**, *В.Е.Бабышкин\*\**, *К.Г.Белосов\**, *А.А.Беляев\*\*\**, *А.В.Бирюков\**, *А.Е.Бубнов\**, *А.А.Быкадоров*, *В.И.Васильков\**, *И.С.Виноградов\**, *А.С.Гвамичава\**, *А.Н.Зиновьев\**, *Р.В.Комаев\*\**, *Б.З.Каневский\**, *Н.С.Кардашев\**, *Ю.А.Ковалёв\**, *Ю.Ю.Ковалёв\**, *А.В.Коваленко\**, *Ю.А.Корнеев\**, *В.И.Костенко\**, *Б.Б.Крейсман\**, *А.Ю.Кукушкин\**, *М.Г.Ларионов\**, *С.Ф.Лихачёв\**, *Л.Н.Лихачёва\**, *С.Ю.Медведев\*\*\**, *М.В.Мелёхин\*\**, *Т.А.Мизякина\**, *Н.Я.Николаев\**, *Б.С.Новиков\**, *И.Д.Новиков\**, *Ю.К.Павленко\*\*\**, *Ю.Н.Пономарёв\**, *М.В.Попов\**, *В.Н.Пышинов\**, *В.М.Рожков\*\*\*\**, *Б.А.Сахаров\*\*\**, *В.А.Серебренников\*\**, *А.И.Смирнов\**, *В.А.Степаньянц\*\*\*\**, *С.Д.Федорчук\**, *М.В.Шацкая\**, *А.И.Шейхет\*\**, *А.Е.Ширшаков\*\**, *В.Е.Якимов\**

*Российская Академия наук и Федеральное Космическое Агентство планируют в 2011 году осуществить запуск уникальной космической обсерватории «Радиоастрон» с 10-метровой рефлекторной антенной, которая вместе с крупнейшими наземными радиотелескопами и станциями слежения образует систему, позволяющую впервые проводить исследования с разрешением в миллионы раз лучше человеческого глаза.*

*Ключевые слова: космический радиотелескоп; интерферометр; угловое разрешение; чувствительность; атомный СВЧ генератор; испытания.*

**«RADIOASTRON» («SPEKTR-R» PROJECT) IS A RADIO TELESCOPE WHICH IS MUCH GREATER THAN THE EARTH. MAIN PARAMETERS AND TESTS** *Yu.A. Alexandrov, V.V. Andreyanov, N.G. Babakin, V.E. Babyshkin, A.A. Belyaev, K.G. Belousov, A.V. Biryukov, A.E. Bubnov, A.A. Bykadorov, V.I. Vasilkov, I.S. Vinogradov, A.S. Gvamichava, A.N. Zinoviev, R.V. Komaev, B.Z. Kanevskiy, N.S. Kardashev, Yu.A. Kovalev, Yu.Yu. Kovalev, A.V. Kovalenko, Yu.A. Korneev, V.I. Kostenko, B.B. Kreisman, A.Yu. Kukushkin, M.G. Larionov, S.F. Likhachev, L.N. Likhacheva, S.Yu. Medvedev, M.V. Melekhin, T.A. Mizyakina, N.Ya. Nikolaev, B.S. Novikov, I.D. Novikov, Yu.K. Pavlenko, Yu.N. Ponomarev, M.V. Popov, V.N. Pyshnov, V.M. Rozhkov, B.A. Sakharov, V.A. Serebrennikov, A.I. Smirnov, V.A. Stepanyants, S.D. Fedorchuk, M.V. Shatskaya, A.I. Sheikhet, A.E. Shirshakov, V.E. Yakimov*

*The Russian Academy of Sciences and the Federal Space Agency are planning to launch the unique space observatory «Radioastron» with 10-meter reflector antenna in 2011, which, jointly with the largest ground radio telescopes and ground tracking stations, will establish the system, permitting to carry out studies with resolution million times better than a human eyesight.*

*Key words: space radio telescope; interferometer; angular resolution; sensitivity; atomic microwave oscillator; testing.*

**\*Учреждение Российской Академии Наук. Физический институт им. П.Н. Лебедева. Астрокосмический центр, Россия, г. Москва.**

**\*\*ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.**

**\*\*\*Закрытое Акционерное Общество «Время-Ч», Россия, г. Нижний Новгород.**

**\*\*\*\*Учреждение Российской Академии Наук. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, Россия, г. Москва.**

**\*\*\*\*\*Открытое Акционерное Общество «Российские Космические Системы», Россия, г. Москва.**

Таблица 1. Основные параметры космического интерферометра.

| Основные параметры интерферометра Радиоастрон                               |                  |                  |                  |                    |
|---|------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Диапазоны частот [ГГц]  | P<br>0,320-0,328 | L<br>1,636-1,692 | C<br>4,804-4,860 | K<br>18,372-25,132 |
| Круг. поляризации x<br>ширина полосы [МГц]                                  | 2 x 4            | 2 x 32           | 2 x 32           | 2 x 32             |
| Ширина лепестка на<br>базе 350 000 км<br>[микросекунды]                     | 540              | 106              | 37               | 7-10               |
| Чувствительность 1σ<br>[мЯн]<br>(GBT, накопление 5 мин и 3 ч - поляризация) | 42/7             | 4/0.7            | 4/0.7            | 10/1.7             |

**Введение**

Перспектива текущего года – запуск космического радиотелескопа (КРТ) «Радиоастрон», который образует с наземными радиотелескопами интерферометр Земля-Космос. Создание первого космического радиоинтерферометра с базой намного больше размеров Земли имеет длительную и сложную историю. Подробная информация о космической радиообсерватории содержится в специальном электронном сайте [1] и публикациях [2-3].

Орбита спутника «Радиоастрон» [4] была выбрана так, что она специальным образом эволюционирует под действием Луны. Средний орбитальный период – 9.5 дней (изменение периода - от 7 до 10 дней), половина большой

оси 189 000 км, наклонение орбиты 51 градус. Радиус перигея – от 10 до 70 тысяч км, апогея – от 310 до 390 тысяч км, нормаль к плоскости орбиты за 3 года описывает на небесной сфере эллипс, большая ось которого 150 градусов, а малая – 40. Вследствие эволюции орбиты около 80% источников в какой-то момент оказываются вблизи плоскости орбиты, т.е. для таких источников возможно получать изображения и с высоким и с умеренным угловым разрешением.

В таблице 1 приведены основные параметры интерферометра Земля-Космос, определённые на основе измеренных в наземных испытаниях параметров КРТ и характеристик 100-метрового наземного радиотелескопа GBT (обсерватория Грин Бэнк, NRAO, США).

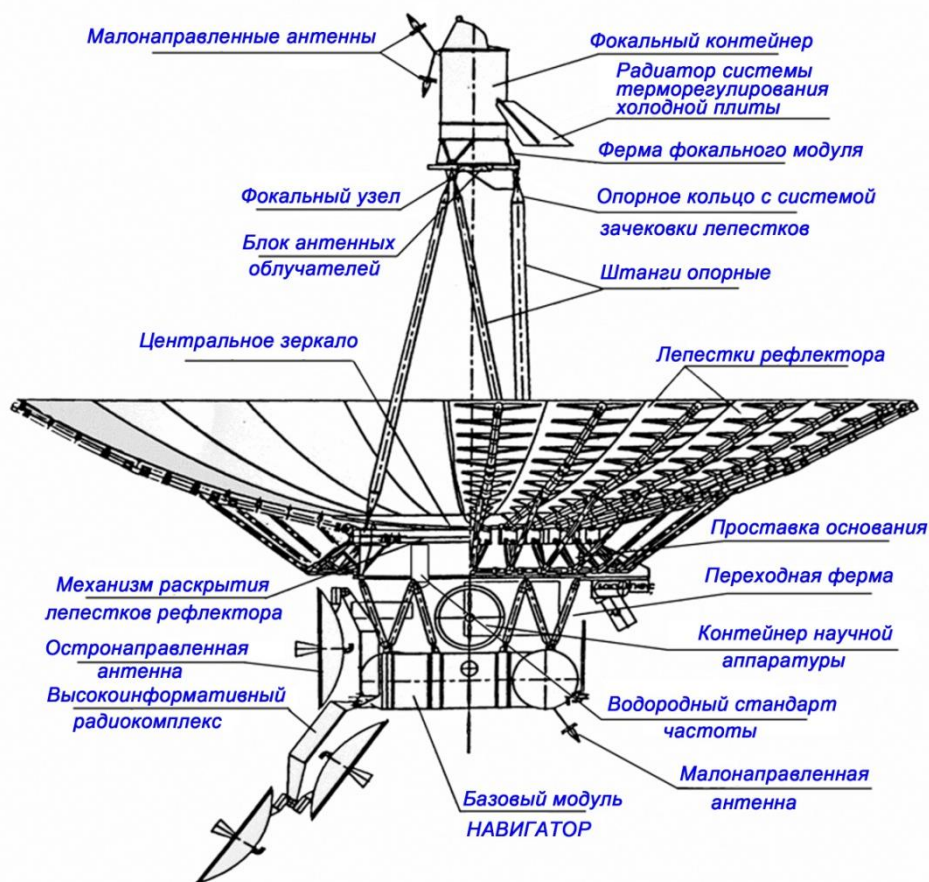
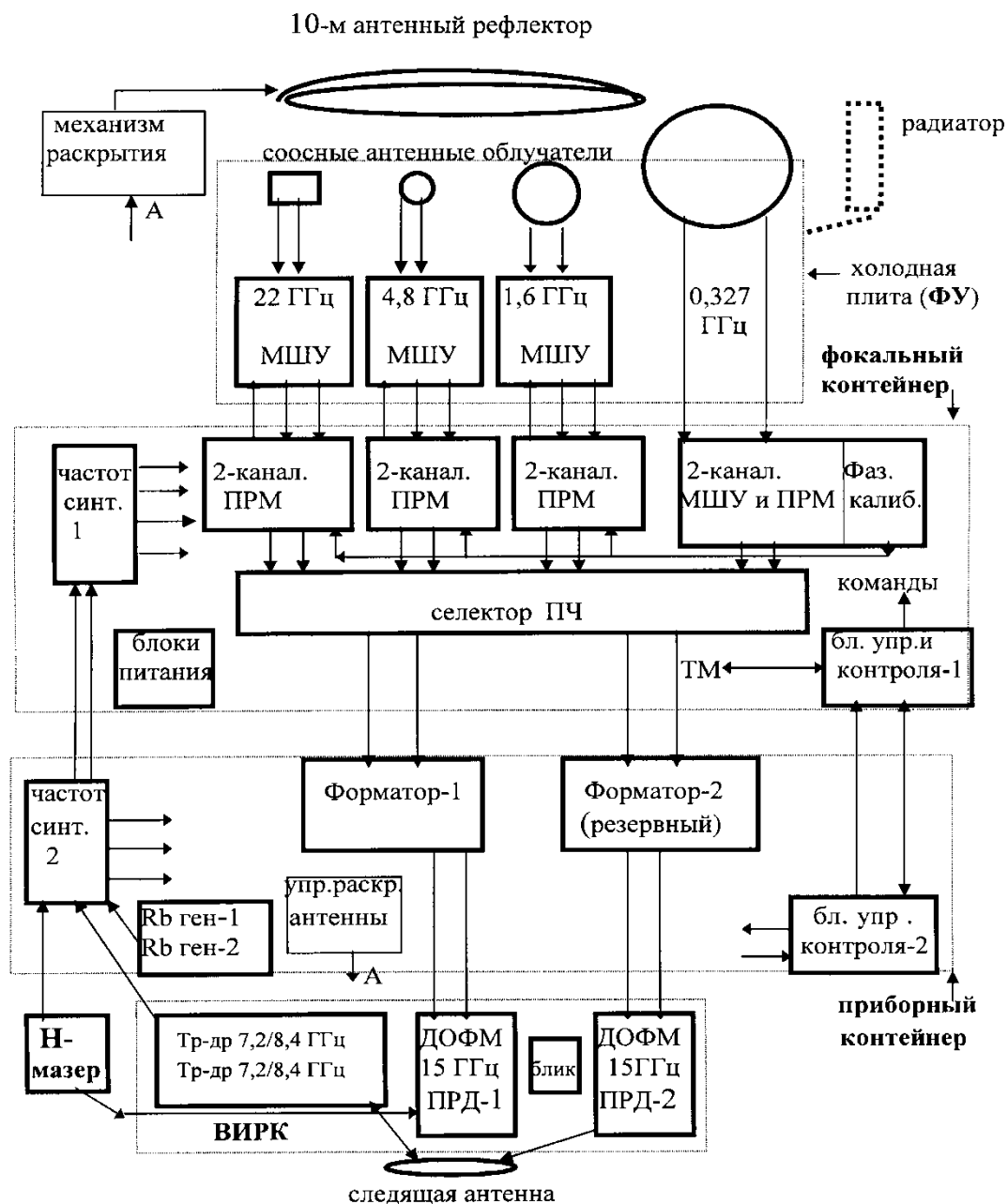


Рис. 1. Компоновка КРТ и космической платформы (базового модуля) «Навигатор»

На рисунке 1 показана общая схема КРТ с космическим аппаратом «Навигатор», на рисунке 2 – блок-схема КРТ. Рисунки 3-7 демонстрируют общий вид КРТ со спутником «Навигатор», а также основные компоненты космического радиотелескопа и некоторые наиболее важные этапы их наземных испытаний.

На рисунке 8 – участники 29-го международного совещания по проекту «Радиоастрон» в НПО им. С.А. Лавочкина.

Общий вид КРТ в закрытом (транспортном) состоянии представлен в этом номере журнала в статье В.В. Хартова.



МШУ – малoshумящий усилитель; ФУ – фокальный узел, содержащий блок антенных облучателей и МШУ; ПРМ – приемник радиоастрономический; ПЧ – промежуточная частота; ТМ – телеметрия; Rb ген-1.2 – рубидиевые генераторы; Н-мазер – водородный генератор (два экземпляра); ВИРК – высоко-информативный радиокомплекс; Тр-др 7.2/8.4 – транспондер входной частоты 7.2 ГГц в выходную – 8.4 ГГц; ДОФМ – двойной относительный фазовый манипулятор; ПРД-1.2 – передатчики астрономических данных на несущей 15 ГГц.

Рисунок 2. Блок-схема КРТ



**Рисунок 3. Комплексные испытания КРТ с космической платформой (базовым модулем) «Навигатор», рефлектор раскрыт. (НПО им. С.А. Лавочкина, июнь 2011 г.)**



**Рисунок 4. Фокальный (слева) и приборный (справа) контейнеры КРТ**



Рисунок 5. Водородные стандарты частоты (мазеры), разработанные для проекта «Радиоастрон» в ЗАО «Время-Ч» (Нижний Новгород)



SRT petals test in ESTEC (1994)

Рисунок 6. Испытания отдельных углепластиковых лепестков антенны КРТ (ЕКА, Нидерланды, Нордвайк, 1994 г.)



**Рисунок 7. Испытания космического радиотелескопа по астрономическим объектам (Пушино, обсерватория Астрокосмического центра ФИАН, весна 2004 г.)**



**Рисунок 8. 29-е международное совещание по проекту «Радиоастрон» (около лётной модели КРТ в НПО им. С.А. Лавочкина, осень 2008 г.)**

### 1 Испытания конструкций КРТ

В мае 2011 года завершены с положительными результатами предусмотренные комплексной программой экспериментальной отработки испытания рефлектора, фокального и приборного контейнеров, водородных стандартов частоты и времени, высокоинформативного радиокомплекса (ВИРК), бортовой кабельной сети для обеспечения функционирования радиотелескопа вместе с космическим аппаратом «Навигатор». Конструкция КРТ и ее агрегатов (в составе полноразмерных технологических изделий для статических и вибродинамических испытаний, радиоастрономической проверки, тепловакуумных испытаний) многократно подверглись нагрузкам и воздействиям, возникающим в условиях наземного изготовления, хранения, транспортировки, при запуске ракеты-носителя, а также при рабочей эксплуатации в условиях орбитального функционирования.

В результате проведенных испытаний требования к конструкции подтверждены, и она допущена к летным испытаниям в составе бортового комплекса научной аппаратуры. Основные технические характеристики конструкции десяти метрового складного параболического рефлектора телескопа после его раскрытия: среднее квадратическое отклонение отражающей поверхности от идеального параболоида 0.7 мм, допустимое отклонение центра облучателя от фокуса параболоида  $\pm 1$  мм. Также подтверждены характеристики всех систем обеспечения теплового режима КРТ.

### 2 Комплекс приемников КРТ

Целью электрорадио испытаний являлись: проверка выполнения команд управления и регистрация телеметрируемых параметров, проверка работы термостатов и температурных режимов приборов комплекса, подтверждение окончательных параметров КРТ. Испытания проводились в экранной камере НПОЛ в соответствии с нормативными документами. В комплексе использовалась штатная кабельная сеть. Управление приборами осуществлялось штатной системой преобразования интерфейсов. Последовательность команд управления комплексом осуществлялась в соответствии с управляющими циклограммами с первым и вторым полукомплектами системы образования частот, форматом и высокоинформативным радиокомплексом (ВИРК).

Телеметрируемые параметры приборов регистрировались штатной телеметрической системой (ТМС) с записью в файл с расширением *tm1*. Состояние комплекса контролировалось в квазиреальном времени на мониторах компьютера при помощи специально разработанной в АКЦ ФИАН программы *P\_TMI\_Extract.exe*. Получение табличного файла данных из записанного файла телеметрии с расшире-

нием *tm1* для вторичной обработки осуществлялось специально разработанной автоматизированной системой обработки и визуализации сеансов телеметрии «АСОВИСТ». Визуализация параметров, в том числе для печати, осуществлялась стандартной программой операционной системы Windows типа Excel. В качестве источника питания использовался имитатор солнечной батареи НПОЛ. В таблице 2 приведены распределение шумовых температур в элементах бортовых приемных устройств и суммарная шумовая температура космического телескопа (в градусах Кельвина) в эксплуатационных условиях на орбите.

**Таблица 2. Шумовая температура каналов КРТ**

| Диапазон             | 92 см | 18 см | 6 см | 1.2 -1.7 см |
|----------------------|-------|-------|------|-------------|
| $T_{\text{МШУ}}$     | 35    | 15    | 25   | 40          |
| $T_{\text{каб}}$     | 9     | 6     | 11   | -           |
| $T_{\text{БАО}}$     | 54    | 5     | 22   | 20          |
| $T_{\text{антенны}}$ | 6     | 4     | 5    | 7           |
| $T_{\text{неба}}$    | 60    | 3     | 3    | 3           |
| $T_{\text{системы}}$ | 164   | 33    | 66   | 70          |

### 3 Бортовой водородный стандарт частоты времени КРТ

В ходе реализации проекта «Радиоастрон» впервые появилась возможность установки на спутник высокостабильного водородного стандарта частоты-времени, использование которого позволяет увеличить чувствительность наземно-космического радиоинтерферометра и упростить обработку информации. По согласованному техническому заданию ЗАО «Время-Ч» были разработаны, изготовлены и испытаны (2007 г.) три комплекта активного бортового водородного стандарта частоты (БВСЧ), получивших индекс VCH-1010. Первый использовался в качестве технологического и образца для КДИ, второй – летный и третий – ЗИП, используемый в полете в качестве холодного резерва. Все три комплекта прошли полный цикл испытаний в соответствии с программами обеспечения надежности (ПОН) и наземной экспериментальной обработки (ПНЭО).

Важнейшими аспектами создания бортового водородного стандарта частоты были:

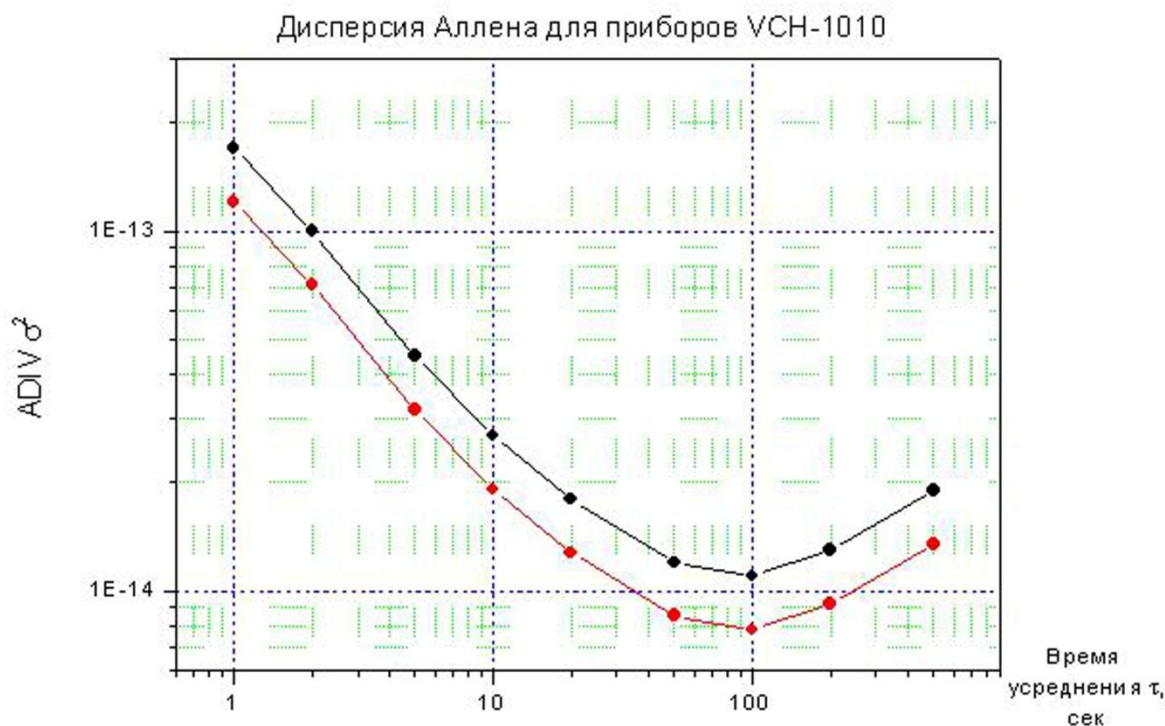
- создание надежной системы механического крепления накопительной колбы на основе углепластиковых материалов, предотвращающей ее разрушение при значительных механических нагрузках на участке вывода КА на орбиту;
- вакуумирование объема резонатора и термостатов за счет космического вакуума с одновременной возможностью наземных испытаний в нормальных климатических условиях (НКУ);

сохранение метрологических параметров, достигнутых на наземных образцах водородных стандартов.

Проведенные метрологические измерения в автономных испытаниях в ЗАО «Время-Ч», АКЦ и НПОЛ подтвердили выполнение выдвинутых в техническом задании требований.

Один из главных параметров приборов – нестабильность частоты стандарта – представлен на рисунке 9.

Ход кривой нестабильности до  $\tau = 100$  сек усреднения соответствует характеристике ТЗ. Превышение требований технического задания при  $\tau > 100$  сек связано с условиями испытаний в НКУ, когда невозможно компенсировать дестабилизирующие факторы: изменения температуры, давления и пр.



Черным цветом изображена измеренная относительная функция  $\sigma_2^2$  2-х одинаковых приборов зав. № 005 и 006. Красным цветом изображена функция  $\sigma_1^2$  одного прибора, как  $\sigma_2^2/\sqrt{2}$

**Рисунок 9. Измерения нестабильности стандарта частоты КРТ**

Важным моментом для осуществления метрологического контроля сигналов БВСЧ на орбите КРТ является использование широкополосного канала связи Борт – Земля для передачи научных данных (ВИРК). При условии осуществления синхронизации этого цифрового потока с сигналами 1 ppS БВСЧ и получения кросскорреляционной функции сигналов в наземно-космическом интерферометре по сильному радиосточнику автоматически осуществляется синхронизации бортовой и наземной (эталонной) шкал времени.

Комплексные испытания КРТ и КА «Навигатор» подтвердили их совместимость и соответствие параметров техническому заданию.

#### Список литературы

- 1 <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf> (Radioastron User Handbook, 2010).
- 2 Крохин О.Н., Кардашев Н.С. Радиоастрономическая техника и методы. // Труды ФИАН, 2000. Т. 228, ч. 1, Космические проекты. С. 3-111.
- 3 Кардашев Н.С. «Радиоастрон» - радиотелескоп много больше Земли. Научная программа // УФН, 2009. Т. 179, № 11. С. 1191-1202.
- 4 Kardashev N.S., Kreisman B.B., Ponomarev Yu.N. New Orbit and New Possibilities of Radioastron Project, in the book «Radioastronomical Tools and Techniques», Kardashev N.S. & Dagkesamanski R.D. ed's. // Cambridge Sc. Publishers, 2007. P. 3-15.