ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический институт имени П.Н.Лебедева
Российской академии наук
ФИАН

ISSN 2410-4914

ПРЕПРИНТ

12

А. Н. ЗИНОВЬЕВ, А. В. КОВАЛЕНКО

# Технология исследования бортовой квантовой шкалы времени космического радиотелескопа проекта РадиоАстрон с использованием результатов стерео экспериментов в 2013–2014 гг.

ФИАН — 2016

**Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева**
ISSN 2410-4914

**Главный редактор** В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус, *научный секретарь* С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

**Редакционная коллегия:** В. С. Бескин, А. А. Горбацевич, О. Д. Далькаров, Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский, Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин, Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

## Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

**Издатель:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

**Адрес редакции:** Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН
Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;
E-mail: *pavel@sci.lebedev.ru*

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:
*http://preprints.lebedev.ru/*

© Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 2016

УДК 621.345.3+520.274+681.2.083+621.396.91

# Технология исследования бортовой квантовой шкалы времени космического радиотелескопа проекта РадиоАстрон с использованием результатов стерео экспериментов в 2013 – 2014гг.

*А.Н. Зиновьев, А.В. Коваленко.*
*Астрокосмический центр ФИАН*

**МОСКВА ФИАН АКЦ • 2016**

## АННОТАЦИЯ

Предложена технология одновременного приема сигналов космического радиотелескопа двумя наземными станциями слежения. Рассмотрен метод измерения разности навигационных задержек для оценки качества баллистического прогноза орбиты космического аппарата. Представлены результаты измерений параметров оборудования наземных станций слежения и бортового водородного стандарта частоты. Рассмотрен способ обнаружения гравитационной компоненты замедления времени во время РСДБ наблюдений с участием космического радиотелескопа. Представлены результаты наблюдений замедления времени для различных удалений космического аппарата от поверхности Земли. Рассмотрены некоторые дополнительные эффекты, обнаруженные во время выполнения стерео экспериментов.


**The onboard quantum time scale research with stereo experiment technology in space radio telescope “RADIOASTRON” project.**


Abstract

The technology of simultaneous reception of the space radio telescope’s signals by two tracking stations is offered. The navigation time delays difference measurement method for quality assessment of the spacecraft orbit’s ballistic forecast is considered.

Results of measurements of parameters of tracking station equipment and the onboard hydrogen maser are provided. The detection method of gravitational component of time deceleration during VLBI observations with an involvement of the space radio telescope is considered.

The observation results of deceleration time for different distances between Earth's surface and the spacecraft are presented. Some additional effects found in runtime of a stereo experiments are considered.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Перечень обозначений и сокращений 4

2. Введение 5

3. Объект и задачи исследований 7

4. Методы и инструменты исследований 9

4.1. Технология и топологическая схема измерений 9
4.2. Функциональная схема измерений 13
4.3. Сопоставление шкал времени наземных станций слежения 16

5. Результаты исследований 22

5.1. Результаты измерений разности хода сигналов КРТ к наземным станциям слежения во время сеансов РСДБ 22
5.2. Результаты наблюдений релятивистского эффекта замедления времени во время полета КРТ (с 65 по 142 виток включительно) 23
5.3. Детектирование эффекта замедления времени как функции дальности КРТ от НСС 26
5.4. Дополнительные эффекты, обнаруженные во время во время настоящих исследований 30

6. Выводы и обнаруженные эффекты 35

7. Заключение 36

8. Литература 37

## 1. Перечень обозначений и сокращений.

| | |
|---|---|
| БВСЧ | Бортовой водородный стандарт частоты |
| БКШВ | Бортовая квантовая шкала времени |
| БШВ | Бортовая шкала времени |
| БКНА | Бортовой комплекс научной аппаратуры |
| ВИРК | Высокоскоинформативный радиоканал |
| ВСЧ | Водородный стандарт частоты |
| ОНА | Остронаправленная антенна |
| КРТ | Космический радиотелескоп |
| КА | Космический аппарат |
| НСС | Наземная станция слежения |
| СЕВ | Служба единого времени |
| ШВ НСС | Шкала времени наземной станция слежения |
| МБАЧ | Модель бортовых атомных часов |
| НСС ПРАО | Наземная Станция Слежения Пущинской Радио - Астрономической Обсерватории |
| РСДБ | Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами |
| ИЦМ | Информационно-цифровой массив |
| ТМС | Телеметрическая система |

## 2. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена продолжению исследований бортовой квантовой шкалы времени (БКШВ) в условиях орбитального полета космического радиотелескопа (КРТ) [2,10]. В основу этих исследований легли также результаты предполетных апробаций методов измерений параметров бортовых водородных стандартов [3]. Продолжение исследований было обусловлено необходимостью в получении независимой оценки качества баллистического прогноза орбиты КРТ.

Как неоднократно отмечалось, важная особенность КРТ проекта “РадиоАстрон” состоит в гибкости схемы формирования сигналов опорных частот 5 МГц и 15 МГц [6,7]. Борт КРТ оснащен коммутируемой группой, состоящей из трех типов источников сигналов опорной частоты. Как показала практика, к первому типу относятся два БВСЧ (основной и резервный). Второй тип представлен двумя бортовыми рубидиевыми стандартами частоты (БРСЧ). К третьему типу относится аппаратура петли фазовой синхронизации (ПФС ВИРК). Аппаратура ПФС ВИРК синхронизируется сигналом наземного водородного стандарта частоты (ВСЧ) наземной станции слежения (НСС). Работа аппаратуры ПФС ВИРК предполагает использования данных баллистического прогноза орбиты КРТ для управления частотой восходящей радиолинии. Таким образом, работа аппаратуры НСС ключевым образом зависит от качества баллистического прогноза. Минимальным условием для выполнения интерферометрического сеанса достаточно участия одной станции для приема научной информации. И такой базовой станцией является 22-метровый телескоп Пущинской радиоастрономической обсерватории в Московской области.

С осени 2013 года в работе проекта “РадиоАстрон” в качестве второй станции слежения стал использоваться 43-метровый радиотелескоп Национальной Радиоастрономической Обсерватории в Грин Бэнке (NRAO, Green Bank, USA). Добавление второй станции, расположенной на американском континенте и значительно удаленной от Пущино по долготе, существенно обогатило потенциал проекта за счет увеличения времени видимости КА «Спектр-Р» наземными станциями слежения.

Конструктивные особенности космического радиотелескопа и других систем бортового комплекса, которые описаны в “Протоколе функциональных ограничений на бортовые системы “ [1] допускают конфигурации, когда интерферометр может наблюдать некоторые радиоисточники так, что бортовая 1,5-метровая антенна, предназначенная для передачи научной информации через ВИРК на станции слежения, имеет связь одновременно с обеими станциями. Подобные возможности возникают нечасто и зависят от положения наблюдаемого радиоисточника на небесной сфере относительно Солнца и, соответственно, от сезона в течение года. В дальнейшем в статье такие конфигурации будут называться стерео экспериментами.

Необходимо отметить, что на интервале настоящих исследований возникла уникальная ситуация, суть которой состоит в том, что на борту КА “Спектр-Р” впервые работает бортовой водородный стандарт частоты активного типа (БВСЧ), используемый для синхронизации всех гетеродинных и тактовых частот бортового комплекса научной аппаратуры (БКНА). Станции приема научной информации также имеют свои водородные стандарты частоты аналогичного типа. Таким образом, в стерео эксперименте возникает конфигурация одновременно работающих трех водородных стандартов – один из них перемещается в гравитационном поле Земли с периодичностью орбиты КРТ, а два других находятся на ее поверхности в местах, определяемых координатами станций слежения. В этом случае можно выделить формальный стержень настоящих исследований в виде оценки качества баллистического прогноза по результатам измерений разности хода сигнала КРТ к каждой из двух НСС с использованием сигналов БКШВ.

Все результаты настоящей работы получены для варианта формирования сигнала опорной частоты 15 МГц на борту КА с использованием БВСЧ, который работал на рассматриваемом интервале времени в непрерывном режиме.

## 3. Объект и задачи исследований

Настоящая работа посвящена исследованию бортовой квантовой шкалы времени (БКШВ), которая выбрана в качестве объекта исследований.
Методы измерений и технологии формирования БКШВ были разработаны ранее на двух предыдущих этапах исследований. Результаты упомянутых исследований опубликованы в работах [2,3].

БКШВ, это последовательность электрических импульсов, сформированных на борту КА с использованием сигналов квантового генератора, роль которого выполнял БВСЧ. Упомянутая последовательность передавалась с борта КА через высокоинформативный радиоканал (ВИРК) и регистрировалась штатным оборудованием станций слежения на Земле совместно с результатами радиоастрономических наблюдений. Синхронизация и сверка отсчетов БКШВ с отсчетами шкал времени НСС выполнялась с использованием как штатного регистрационно-декодирующего оборудования, так и с применением специализированного информационно-измерительного комплекса “КОРВЕТ-Р” [3] . Отметим, что в качестве резервных источников опорного сигнала 5 МГц на борту КА установлены два рубидиевых стандарта частоты. В отличие от рабочей частоты атомного перехода водородного стандарта, равной 1420.405 МГц, рабочая частота атомного перехода рубидиевого стандарта (Rb87) составляет около 6834.682 МГц. Во время выполнения настоящих исследований рубидиевые квантовые генераторы не использовались, и формирование БКШВ на основе рабочей частоты атомного перехода рубидиевого стандарта не производилось.

В результате предыдущих исследований работы БВСЧ появилась возможность непосредственного измерения дальности КРТ от НСС [2]. Однако, этот способ измерения с использованием БКШВ очень чувствителен к ошибке синхронизации между наземной и бортовой шкалами времени. Для практического определения ошибки синхронизации были выполнены специальные стерео эксперименты одновременного приема сигналов КРТ двумя НСС.

На первых этапах исследований БКШВ**,** функционально, была предназначена для контроля качества работы регистрационно - декодирующего оборудования проекта “РадиоАстрон” (ботовой прибор Форматор, наземные Декодеры научных данных и регистраторы научных данных типа RDR). В основе технологии формирования БКШВ лежит эмпирическое соотношение между последовательностью номеров кадров бортового Форматора и значениями радиальной скорости космического радиотелескопа [1]. Полученная на первом этапе космических исследований технология формирования БКШВ обладала значительной погрешностью синхронизации с наземными шкалами времени, достигавшей 0.25 с. Отметим, что за нуль тактов БКШВ принят момент времени, соответствующий 13:00:00 07.01.2013 UTC по показаниям СЕВ НСС Пущино. Этот момент выбран исходя из условий, рассмотренных ниже.

Совершенствование технологии формирования БКШВ с целью снижения погрешности синхронизации породило идею использования особенностей орбиты КРТ и взаимного расположения работающих НСС (Пущино и Грин Бэнк). Используемая орбита КРТ и взаимное расположение НСС Пущино и Грин Бэнк принципиально позволяют выполнять стерео эксперименты, которые состоят в том, что обе наземные станции одновременно способны следить за движением КРТ и принимать сигналы, передаваемые через ВИРК. Обе НСС могут одновременно (параллельно) регистрировать результаты РСДБ экспериментов. Дополнительная особенность выполненных стерео экспериментов состоит в том, что все эксперименты проводились в рамках основной научной программы. Для выполнения стерео экспериментов не выделялось дополнительного наблюдательного времени, – основного ресурса миссии “РадиоАстрон”. Как показала практика, стерео эксперименты могут выполнять дублирующую функцию при отказе одной из НСС. Поскольку задача синтеза БКШВ относится к чисто технологическим результатам проекта, то и заявка на участие в конкурсе на наблюдательное время не подавалась.

Суть настоящих исследований состоит в логическом продолжении исследований БКШВ, начатых в [2, 3 ], на новом технологическом уровне. На текущем этапе исследований решаются задачи сопоставления полученных результатов измерений с параллельно наблюдаемыми эффектами, такими как гравитационный компонент замедления БКШВ, влияние на ход БКШВ магнитного поля Земли и реакцию энергетической установки КРТ на прохождение радиационных поясов Ван Аллена [4,5 ]. Перечисленные особенности стерео экспериментов позволяют определить характерный перечень измеряемых величин. Успешное выполнение стерео экспериментов позволяет выполнить ряд важных измерений, таких как:

- **Дифференциальная разность хода наземных шкал времени** (целевая синхронизация БКШВ);
- **Разность навигационных задержек** ( методом БКШВ, прямым корреляционным методом для сигналов принятых НСС от КРТ, корреляционным методом по результатам РСДБ наблюдений).
- **Независимое измерение дальности** для обеих НСС и КРТ по характерному взаимному сдвигу БКШВ и ШВ НСС.
- **Оценка качества прогноза орбиты КРТ** путем синхронного сопоставления результатов измерения радиальных скоростей и дальностей с прогнозными значениями;
- **Относительная разность частот трех квантовых генераторов**, используемых в стерео экспериментах (одного бортового и двух наземных стандартов НСС) по результатам Допплеровских измерений и РСДБ - данным;
- **Относительное замедление хода часов** для различных удалений КРТ от НСС с использованием БКШВ.

# 4. Методы и инструменты исследований
## 4.1. Технология и схема измерений

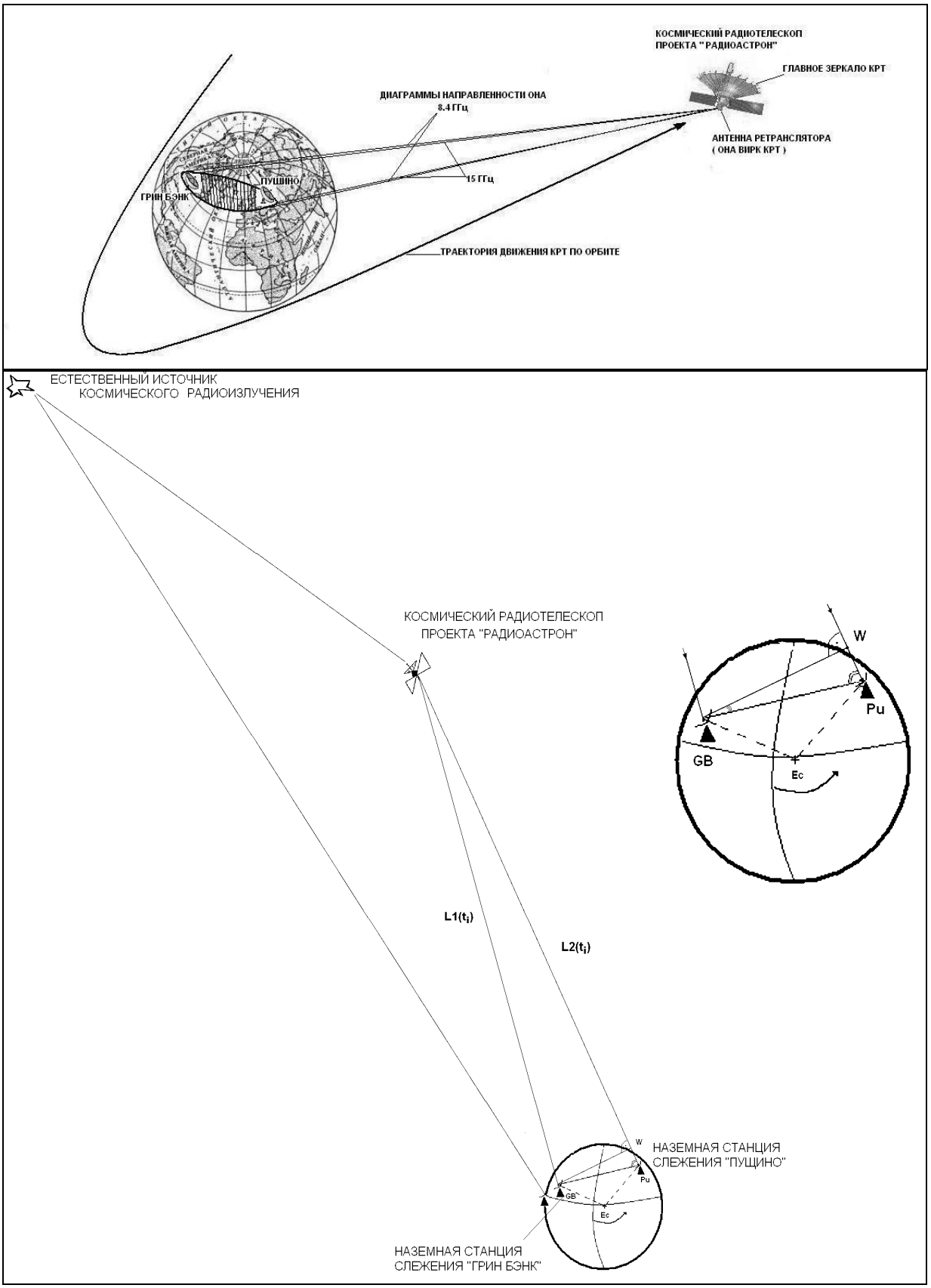


рис.1

На рисунке 1 схематично показаны условия выполнения стерео эксперимента В верхней части рисунка изображена типовая конфигурация инструментов, задействованных в стерео экспериментах. В нижней части рисунка представлена упрощенная геометрическая схема стерео приема результатов РСДБ эксперимента, выполняемого в рамках основной научной программы.

В рамках основной научной программы проекта РадиоАстрон формируется ежемесячная программа наблюдений источников космического радиоизлучения [6,7]. В процессе подготовки месячной программы выполняется ряд необходимых расчетов и проверок корректности наведения антенны КРТ на наблюдаемый источник. Баллистическая группа готовит баллистические расчеты для работы каждой из двух работающих НСС (в г. Пущино, Россия и в населенном пункте Грин Бэнк, США). После завершения подготовки ежемесячной программы наблюдений, группой исследователей, авторов настоящего материала, выполняет дополнительные расчеты совместной и одновременной (по шкале UTC) видимости КРТ двумя НСС на всех сеансах сформированной ежемесячной программы. Для расчета стерео эксперимента используется специализированный программный комплекс SSAMM [8].

Расчет стерео экспериментов завершается формированием месячного списка сеансов, для которых выполняются все условия стерео эксперимента.

На представленном рисунке условно изображены: Земля, две НСС, один наземный РСДБ радиотелескоп и космический радиотелескоп проекта РадиоАстрон. Дистанции между КРТ и обеими НСС условно обозначены L1(t) и L2(t) (для НСС Грин Бэнк и НСС Пущино соответственно). *Ключевая особенность* проведения стерео экспериментов состоит в том, что эксперимент выполняется во время сеанса наблюдений КРТ в режиме РСДБ. На время наблюдения за естественным источником космического радиоизлучения главным зеркалом КРТ остронаправленная антенна (ОНА) ВИРК КРТ своим собственным зеркалом должна быть направлена в сторону одной из используемых НСС (либо Пущино, либо Грин Бэнк). Система наведения ОНА устроена таким образом, чтобы обеспечить кроме основной задачи, выполнение целого ряда температурных ограничений на элементы КРТ. Узкая диаграмма направленности ОНА (около 0.7 градуса.) в подавляющем числе случаев не позволяет одновременную полноценную видимость обеих приемных антенн НСС и не обеспечивает дублированный прием сигналов КРТ. Однако, изредка возникают комбинации расположения КРТ относительно обеих НСС, когда возможен одновременный прием и декодирование сигнала КРТ двумя НСС. Практические расчеты и эксперименты на эту тему позволили получить положительные результаты с очень важным ограничением, - антенна ОНА во время стерео эксперимента должна быть направлена только в сторону антенны РТ-22 НСС Пущино, диаметром 22 метра. Антенна НСС Грин Бэнк, диаметром 43 метра, в стерео эксперименте всегда выполняет “подсматривающую” (или ассистирующую) функцию.

Практическое выполнение основной научной программы не предполагало испытание технологий прямых измерений действительных значений опорной частоты БВСЧ. Указанная задача оформилась по результатам измерений во втором (или первом летном) этапе исследований БКШВ [2]. Для мониторинга БКШВ, в качестве основной измеряемой величины, было выбрано замедление БКШВ относительно ШВ НСС в виде $\Delta\tau/\Delta T$. Величина $\Delta\tau$ обозначает изменение интервала времени между фронтами сигналов секундных меток, упомянутых шкал времени, с учетом величины текущей навигационной задержки; $\Delta T$ – интервал наблюдений по ШВ НСС [2,3 ].

В стерео эксперименте основной измеряемой физической величиной служит разность хода сигнала от КРТ к двум НСС. В основе сигналов, передаваемых с борта КА, используется высокостабильный сигнал БВСЧ. Из сигнала, передаваемого во время радиоастрономических наблюдений, возможно извлечение сообщений КРТ, в которых содержится информация о ходе БКШВ. Структура сообщения содержит, в том числе, и шумоподобную информацию от наблюдаемого источника космического радиоизлучения. Прием сигнала от КРТ выполняется обеими НСС с использованием своих собственных наземных водородных стандартов частоты и времени. Указанные выше технические средства позволяют измерить разность хода сигналов КРТ одновременно двумя способами:

- штатным корреляционным методом, используя шумоподобную информацию от естественного источника космического излучения, принятую одновременно двумя НСС.
- методом БКШВ. Для измерения используется сигнал имитационной модели бортовых атомных часов (МБАЧ) и сигналы двух шкал времени НСС.

Для контроля результатов измерений удобно пользоваться результатами баллистического расчета - предсказаниями орбитального положения КРТ.
Если обозначить измеряемую физическую величину:
$\Delta L_{obs}$ -разность хода сигналов КРТ РадиоАстрон к двум НСС, то контрольные прогнозные значения дальностей принимают вид:

$$L1_{calc}(t_i) = predict_L^{GB}(t_i)$$
$$L2_{calc}(t_i) = predict_L^{Pu}(t_i)$$
$$\Delta L_{calc}(t_i) = L1_{calc}(t_i) - L2_{calc}(t_i). \quad (1)$$
$$\Delta L_{obs}(t_i) = L1_{obs}(t_i) - L2_{obs}(t_i). \quad (2)$$

Особенность используемой орбиты КРТ состоит в том, что
динамический диапазон измеряемой величины находится в пределах:

$$-6.6 < \Delta L_{obs}(t_i) < +6.6 \text{ тыс. км.} \quad (3)$$

Разность хода сигналов КРТ по задержке составляет:

$$|\Delta\tau_{obs}(t_i)| < |22| \text{ мс.} \quad (4)$$

Обозначим разность хода шкал времени наземных станций слежения как:

$$\Delta L3(t_i) = \Delta ШВ_НСС(t_i) * c. \quad (5)$$

Таким образом, основное контрольное соотношение принимает в вид уравнения:

$$\Theta(t_i) = \Delta L_{obs}(t_i) - \Delta L_{calc}(t_i) - \Delta L3(t_i) \approx 0. \quad (6)$$

Для количественной оценки качества баллистического прогноза логично воспользоваться отклонением $\Theta(t_i)$ от нуля.

Особенность расположения НСС накладывает дополнительное ограничение на дальность КА “Спектр-Р” , которое выглядит как:

$$L1(t_i) \,\&\, L2(t_i) > 178 \text{ тыс. км. (Ec).} \quad (7)$$

## 4.2. Функциональная схема измерений .

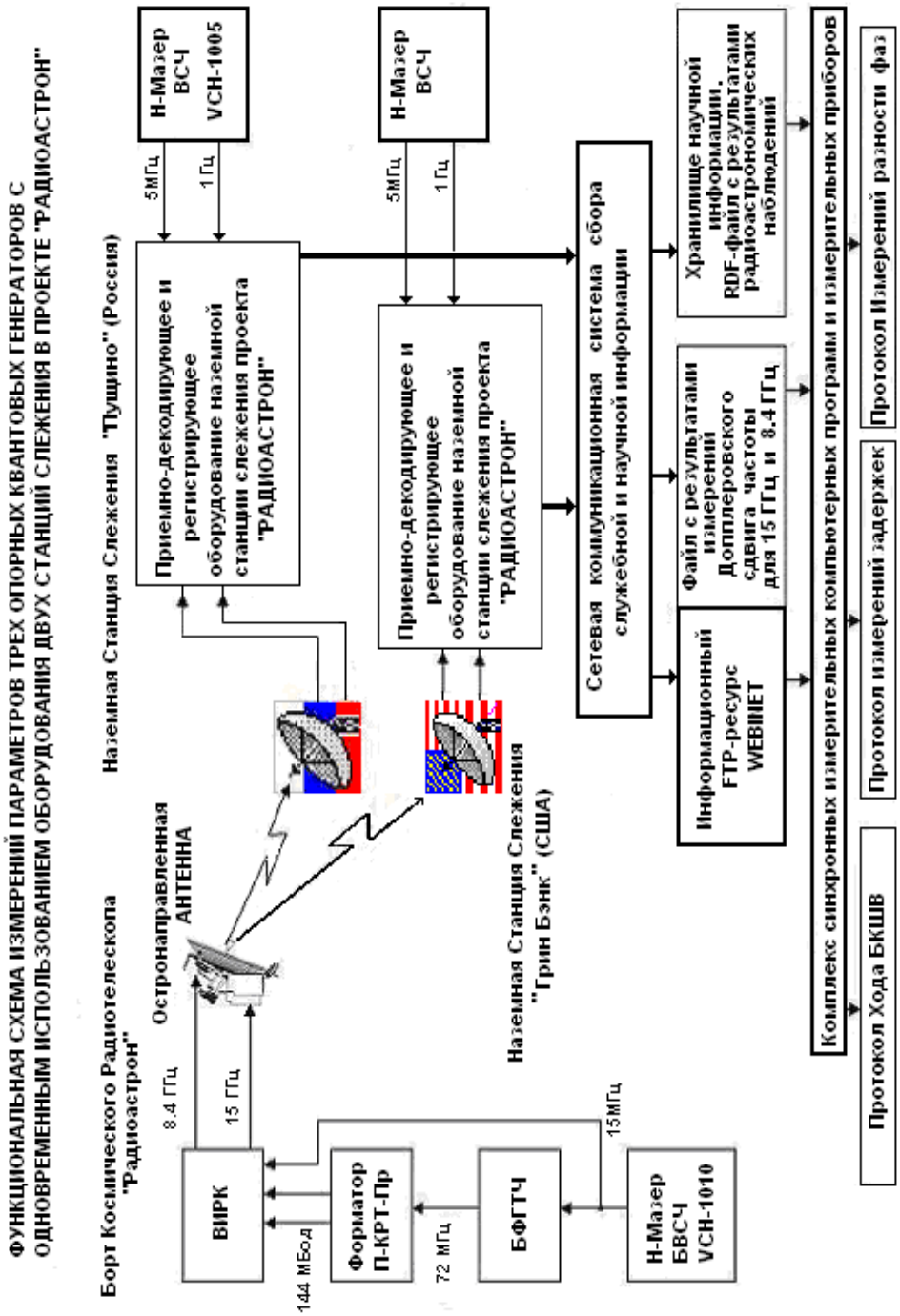


рис.2

На рисунке 2 представлена укрупненная функциональная схема измерений относительной разности опорных частот двух наземных и одного бортового стандартов частоты и времени. Подобная схема была опробована на предыдущем этапе исследований БКШВ и использована в технологии конструирования МБАЧ [2]. Отличительная особенность представленной схемы состоит в наличии дополнительного параллельного канала приемно-декодирующего и регистрирующего оборудования второй НСС (Грин Бэнк). Комплекс синхронных измерительных программ и измерительных приборов расширен для параллельной работы со вторым комплектом технических средств. Оба используемых комплекта технических средств аналогичны на функциональном уровне.

С подробным описанием технического оснащения НСС проекта РадиоАстрон можно ознакомиться по опубликованным ранее материалам предыдущих этапов исследований [2,3,6,7].

Работу схемы можно проиллюстрировать следующим образом.

Данные баллистического прогноза, подготовленные заранее, загружаются в управляющие компьютеры обеих НСС. На борт КА, примерно за сутки, по каналу служебной телеметрии загружается циклограмма работы БКНА на предстоящем сеансе РСДБ наблюдений. Для случая, когда сеанс РСДБ наблюдений используется в качестве стерео эксперимента, никаких дополнений или изменений в циклограмму БКНА КРТ вносить не требуется. К моменту начала стерео эксперимента обе НСС занимают позиции для одновременного приема сигнала КРТ согласно баллистическому прогнозу. Прием сигналов КРТ несколько опережает декодирование и регистрацию информации с научными данными РСДБ - сеанса. Это обусловлено необходимостью предварительного контроля и подстройки оборудования НСС для обеспечения оптимального соотношения сигнал/шум на входе приемников 15 ГГц НСС. В результате успешного выполнения стерео эксперимента в запоминающих устройствах каждой станции слежения накапливаются два комплиментарных (complementary tracking) массива данных (RDF-файлы). Упомянутые массивы представляют собой взаимодополняющие компьютерные файлы в разнообразных форматах и содержат информацию, относящуюся к:

- радиосигналу, наблюдавшегося источника космического излучения с текущей позиции КРТ;
- данным телеметрической системы КРТ;
- результатам баллистических измерений;
- результатам мониторинга СЕВ обеих НСС;
- результатам работы телеметрических систем обеих НСС.

Для контроля за результатами фазовых измерений, выполняемых измерительным комплексом, НСС Пущино оснащена дополнительным комплектом регистрирующего оборудования типа RDR. Во время проведения стерео экспериментов этот дополнительный комплект работает параллельно с основным комплектом регистрирующего оборудования. Однако, режим записи дополнительного комплекта отличается от режима записи основного комплекта регистрирующего оборудования. Запись результатов РСДБ наблюдений на дополнительный комплект выполняется короткими сегментами. Измерительный комплекс, используя записи основного и дополнительного комплектов регистрирующего оборудования, контролирует непрерывность и корректность хода БКШВ. Входящий в состав измерительного комплекса модуль акселерометра использует оба массива записей, как для измерения орбитальной скорости КА, так и для измерений радиальных скоростей КА корреляционным методом.

Все результаты измерений и сформированные массивы, относящиеся к каждому конкретному эксперименту, накапливаются в центральном хранилище Московского подразделения АКЦ ФИАН.

В качестве источника опорного сигнала в службе единого времени (СЕВ) НСС Пущино используется квантовый стандарт частоты и времени на основе водородного Н-мазера активного типа VCH1005. Для синхронизации ШВ НСС с ШВ UTC используется специализированное оборудование в виде GPS тайм-сервера. Сигналы секундных меток ШВ НСС используются для синхронизации работы регистрационно-декодирующего оборудования НСС. Во время проведения стерео эксперимента регистрация не расшифрованной информации, принимаемой с борта КА по каналу ВИРК, начинается по сигналу текущей, заранее выбранной, секундной метки ШВ НСС. Регистрация выполняется параллельно на двух НСС. В результате успешного выполнения стерео эксперимента наблюдатель получает, как минимум, четыре результата измерений разности хода наземных ШВ (по числу сканов в одном РСДБ сеансе). Кроме того, в записях РСДБ наблюдений содержится информация о ходе БКШВ относительно каждой из наземных ШВ НСС. В итоге наблюдатель получает три разности хода между двумя наземными и одной бортовой квантовыми шкалами времени, соответствующих одному моменту времени по TCG (в пределах погрешностей синхронизации ШВ НСС).

Таким образом, параллельная работа схемы измерений, представленной на рис.2, позволяет определить погрешность синхронизации БКШВ относительно сигналов секундных меток ГЛОНАСС и GPS.

### 4.3. Сопоставление шкал времени НСС

Разность хода шкал времени двух используемых НСС в виде ΔШВ_НСС ($t_i$) входит в основное контрольное соотношение (6) и, следовательно, нуждается в постоянном мониторинге. На практике, каждая НСС оснащена специальным оборудованием, которое с интервалом в 2 секунды регистрирует интервал времени между фронтами импульсов секундных меток (сигналы 1ppS) локальной шкалы времени НСС и шкалы времени UTC. Сигналы секундных меток локальной шкалы времени каждой НСС формируются с использованием высокостабильных сигналов наземных водородных квантовых стандартов частоты и времени. Сигналы секундных меток шкалы времени UTC формируются с использованием многоканальных GPS приемников и специализированных тайм-серверов, входящих в состав служб единого времени (СЕВ) каждой НСС.

В качестве иллюстрации технологии мониторинга разности хода ШВ НСС приведем конкретный пример.

По данным измерений СЕВ НСС Грин Бэнк величина интервала времени, между секундными метками шкалы времени GB и шкалы времени UTC на 30.09.2014 00:00:08, составила $\tau 1 = -131.194$ нС. (ftp://webinet.asc.rssi.ru/radioastron/GB_ts/TFR_report/GB_time/2014_09/clockdata_2014_09_30.gz) Величина аналогичного интервала времени на 29.11.2014 00:00:07 составила $\tau 2 = -306.186$ нС. Для НСС Грин Бэнк изменение величины интервала времени между секундными метками шкалы времени GB и шкалы времени UTC на интервале ΔT=5184000 секунд составило $\Delta t = (\tau 2 - \tau 1) = -174.991186$ нС. Таким образом, отклонение частоты опорного генератора СЕВ НСС Грин Бэнк относительно опорного генератора шкалы времени UTC можно оценить, как: $\Delta t/\Delta T = -3.374$ E-14.

По данным измерений СЕВ НСС Пущино величина интервала времени между секундными метками шкалы времени Pu и шкалы времени UTC на 29.11.2014 00:00:02 составила $\tau 1 = +3.9454$ мкС. Новый Н-мазер был установлен на НСС Пущино 22.09.2014 и синхронизирован со шкалой времени UTC в 08:41:19, $\tau 2 = +378.94$ нС.
(ftp://webinet.asc.rssi.ru/radioastron/Push_ts/tfr_report/2014/2014_11_29/pu20141128223701-20141129081400.tfr) Для НСС Пущино изменение величины интервала времени между секундными метками ШВ НСС и шкалы времени UTC на интервале ΔT=5868573 секунд составило $\Delta t = (\tau 2 - \tau 1) = +3.9454$ мкС. Таким образом, отклонение частоты опорного генератора СЕВ НСС Пущино относительно опорного генератора шкалы времени UTC можно оценить, как : $\Delta t/\Delta T = +6.713$ E-13.

Разность нормализованных частот опорных генераторов НСС Грин Бэнк и Пущино, по состоянию на 29.11.2014, составила :

$$(F_{изм} / F_{ном})_{PU} - (F_{изм} / F_{ном})_{GB} = 7.051 \text{ E-13}. \quad (8)$$

Таким образом, суммарная величина ΔШВ_НСС ($t_j$) на момент времени 29.11.2014 00:00:07 составляла **-0.**1749 мкС - 3.9454 мкС = -4.1203 мкС.
В соответствии с (5) ΔL3 ($t_j$) = -1.235234 км.

Графическое изображение результатов мониторинга разности хода ШВ НСС и ШВ GPS представлено на рисунке 3.

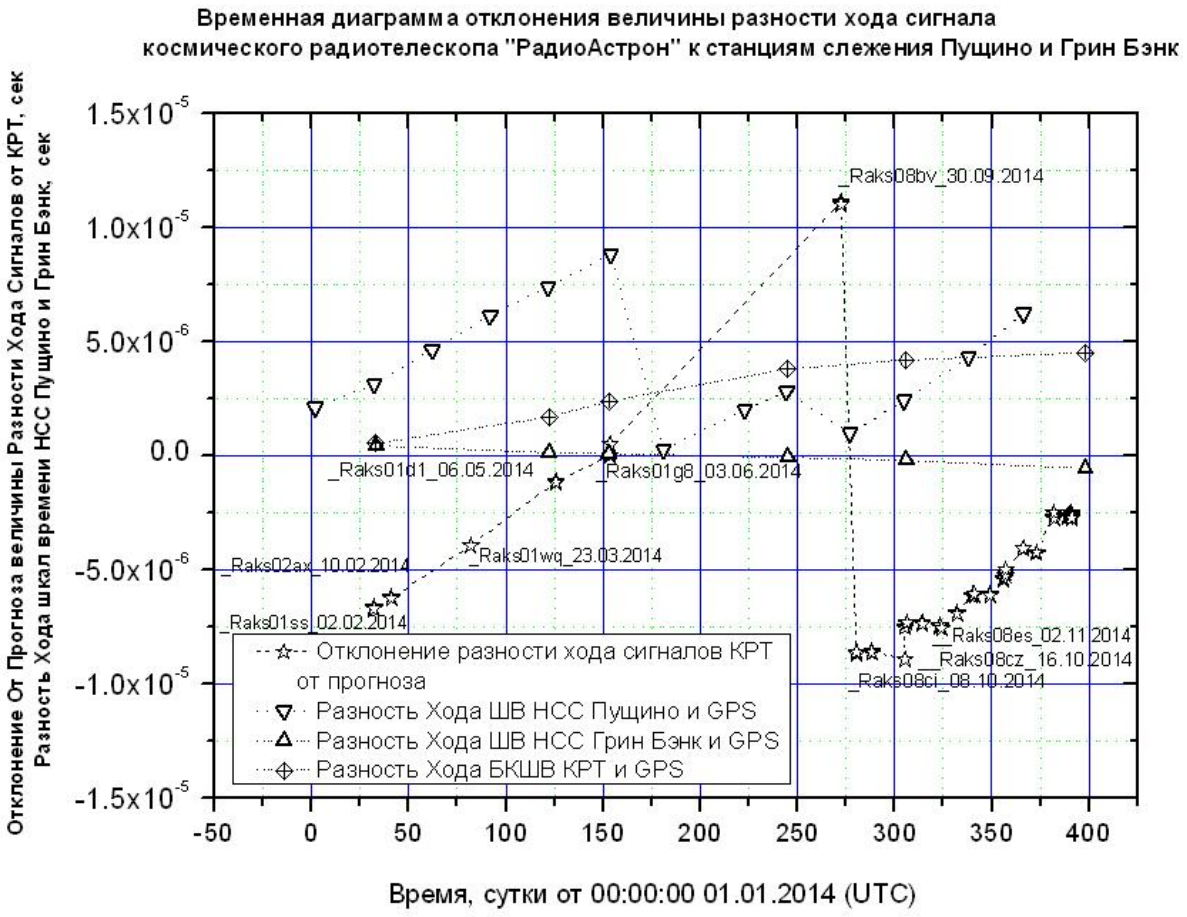


рис.3

Технология синхронизации “по значению параметра” была выбрана в связи с отклонением действительного значения частоты источника опорного сигнала СЕВ Пущино и необходимостью поддержания соразмерной величины интервала между синхронизирующим и синхронизируемым сигналами секундных меток. В качестве ключевого параметра использовалась максимально допустимая длительность интервала между фронтами одноименных секундных меток, равная 10 микросекунд (примерно в 10 раз выше погрешности баллистического прогноза КРТ по навигационной задержке). Следствием используемой технологии является период синхронизации, величина которого может быть определена, как:

$$T_{syn} = 10\ E\text{-}5\ /\ 7.051\ E\text{-}13 = 14285714.2857\ \text{сек.}\ (9).$$

**<u>Таким образом, для соблюдения условия соразмерности задержки с погрешностью баллистического прогноза, при относительной разности частоты источника опорного сигнала СЕВ Пущино и СЕВ Грин Бэнк, процедуру синхронизации ШВ НСС Пущино необходимо выполнять каждые 165.34 суток</u>**

Для определения разности хода БКШВ относительно ШВ GPS возникла необходимость в использовании дополнительных измерительных средств.
Так как сигналы секундных меток БКШВ формируются на борту КРТ асинхронно по отношению ШВ НСС, то измерительный комплекс, используемый для исследования БКШВ, нуждался в дооснащении. Модернизация состояла в подключении группы ГЛОНАСС\GPS приемников и в разработке дополнительных программно- аппаратных модулей интерфейса и управления. Результаты измерений разности хода БКШВ относительно ШВ GPS представлены на рисунке 3 зависимостью, отмеченной символами “-◈-“.

Корректная работа используемого измерительного комплекса была бы невозможна без выполнения процедуры пространственно-временной синхронизации БКШВ и ШВ НСС Пущино. Под упомянутой процедурой синхронизации мы понимаем результат измерения (определения) величины разности хода сопоставляемых шкал времени, которое соответствует одному, характерному положению КРТ на орбите. Под характерным положением КРТ на орбите мы понимаем область перигея для которой справедливы следующие условия :

- на расчетном интервале ожидания синхронизации величина измеренной навигационной задержки, определяемой дальностью КРТ от НСС, достигает минимального значения по сравнению со значениями на обеих границах упомянутого интервала времени;

- на расчетном интервале ожидания синхронизации величина радиальной скорости КРТ, обуславливающей соответствующий Допплеровский сдвиг частоты сигнала КРТ, измеренный НСС, изменяет знак. При этом, сами абсолютные величины измеренного Допплеровского сдвига на обеих границах упомянутого интервала времени в расчет не принимаются;

- на расчетном интервале ожидания синхронизации диапазон измерений величины навигационной задержки не превышает максимально допустимого расчетного значения для обоих смежных витков КРТ, на рубеже которых выполняется процедура синхронизации.

В качестве иллюстрации процедуры пространственно-временной синхронизации БКШВ и ШВ НСС Пущино на рисунке 4 представлена

временная диаграмма результатов измерений радиальной скорости КРТ на 65 витке. На диаграмме отмечено характерное положение КРТ соответствующее моменту пространственно-временной синхронизации.

Рис. 4

Последующая сверка хода шкал (НСС Пущино, НСС Грин Бэнк и БКШВ) позволила определить суммарную погрешность синхронизации БКШВ относительно ШВ НСС Пущино. Используя результаты измерений коррелометра, входящего в состав измерительного комплекса “КОРВЕТ-Р” было установлено, что на всем интервале настоящих исследований абсолютная погрешность синхронизации упомянутых шкал времени не превышала двух периодов бортовой тактовой частоты 72 МГц

(т.е. $\Delta\tau_s < \pm 33$нС ).

В качестве иллюстрации на рисунках 4.1 и 4.2 представлены пример отчета корреляционных измерений и слайд панели коррелометра, соответствующий измерениям на сеансе Raks01d, выполнявшегося в рамках программы РСДБ наблюдений КРТ 06.05.2014 с 17;00 по 18:00 (UTC).

Особенность применения коррелометра состоит в том, что результат измерений разности хода не зависит от величины взаимного сдвига шкал времени обеих НСС. По этой причине, для корректного сопоставления результата измерений с

прогнозным значением, необходимо учитывать текущие взаимные сдвиги между ШВ НСС Грин Бэнк, ШВ НСС Пущино и шкалой времени прогноза. Упомянутый учет осуществлялся по результатам измерений НСС интервалов времени между соответствующими сигналами секундных меток всех используемых шкал времени и сигналами глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Для иллюстрации технологии измерений разности хода и сопоставления с аналогичным прогнозным значением приведем пример на основе эксперимента Raks01d:

1. К моменту начала эксперимента 06 мая 2016 17:00:00 по локальным шкалам времени НСС Грин Бэнк и НСС Пущино (в масштабе UTC) баллистический прогноз предполагал расстояние между КА “Спектр -Р” и НСС Пущино, равное L2(t)=312084.455402 км. Аналогичное расстояние для НСС Грин Бэнк составляло L1(t)=313800.975924 км.

   Согласно (1), прогнозная разность хода сигналов КРТ составляла

   $$\Delta L_{calc}(t) = 1716.520522 \text{ км.}$$
2. Результат измерений коррелометра составил $\Delta L_{obs}(t) = 1716.180662$ км.
3. Согласно (6), отклонение от прогноза оценивается как разность $\Theta_o(t) = \Delta L_{obs}(t) - \Delta L_{calc}(t) = -0.339859$ км.
4. Для получения итоговой оценки отклонения разности хода необходимо учесть взаимные сдвиги ШВ. По данным измерителей интервалов времени НСС Грин Бэнк сдвиг фронта секундной метки ШВ НСС относительно сигналов GPS составил +117.77 наносекунд. Аналогичная величина для НСС Пущино составила -7.644 микросекунды. Результирующая величина разности хода, обусловленная взаимным сдвигом ШВ обеих НСС, составила –2.256306 км.
5. По результатам предыдущих экспериментов установлено, что сдвиг ШВ баллистического прогноза составлял +9.981 микросекунды, что соответствует величине разности хода в +2.992228 км.
6. Подводя итог и оценивая отклонение измерений разности хода сигнала КРТ к обеим НСС от прогнозного значения, можно отметить:

   $$-0.339859 + 2.992228 – 2.256306 = 0.396063 \text{ км.}$$

   Отметим, что полученный результат удовлетворяет техническим условиям проекта “РадиоАстрон” (+/- 600м).

Представленная технология позволяет аналогичным образом оценивать отклонение относительных скоростей КРТ и использовать результаты для поверки акселерометра, входящего в состав измерительного комплекса “КОРВЕТ-Р”.

ТаблицаОтклоненийРазностиХода.xls

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ДатаВремя | Секунда_2000 | Сутки2014 | ДальностьКРТ_Ес,км | ОтклонениеОтПрогнозаРазностиХодаСигналов,км | КодЭксперимента | ККФ | BitErrorRate_Assist. | ОНА_КРТ |
| 2 | 02.02.2014 00:00:00 | 444614400 | 32.000 | 338118.9534 | -1.9876389 | _Raks01ss | 0.732 | 0.15 | GB |
| 3 | 02.02.2014 00:15:00 | 444615300 | 32.010 | 337915.8085 | -2.00071 | _Raks01ss | 0.85149 | 0.21 | |
| 4 | 02.02.2014 00:30:00 | 444616200 | 32.021 | 337709.9937 | -2.000288 | _Raks01ss | 0.80198 | 0.31 | |
| 5 | 02.02.2014 00:45:00 | 444617100 | 32.031 | 337501.5057 | -2.011716 | _Raks01ss | 0.76238 | 0.46875 | |
| 6 | | | | | | | | | |
| 7 | 10.02.2014 23:10:00 | 445389000 | 40.965 | 325526.8832 | -1.862269405 | _Raks02ax | 0.88119 | 0.062 | Pu |
| 8 | 10.02.2014 23:30:00 | 445390200 | 40.979 | 325101.9532 | -1.851635796 | _Raks02ax | 0.90099 | 0.035 | |
| 9 | 10.02.2014 23:50:00 | 445391400 | 40.993 | 324671.8744 | -1.872920723 | _Raks02ax | 0.9604 | 0.018 | |
| 10 | | | | | | | | | |
| 11 | 23.03.2014 21:20:00 | 448924800 | 81.889 | 336790.0323 | -1.176881256 | _Raks01wq | 0.61386 | 0.28125 | GB |
| 12 | | | | | | | | | |
| 13 | 06.05.2014 17:00:00 | 452710800 | 125.708 | 314751.7473 | -0.33985915 | _Raks01d1 | 0.78218 | 0.0874 | Pu |
| 14 | 06.05.2014 17:15:00 | 452711700 | 125.719 | 311875.1901 | -0.353130163 | _Raks01d2 | 0.92079 | 0.034 | |
| 15 | 06.05.2014 17:30:00 | 452712600 | 125.729 | 314015.6893 | -0.343366619 | _Raks01d3 | 0.9703 | 0.0267 | |
| 16 | 06.05.2014 17:45:00 | 452713500 | 125.740 | 313643.3999 | -0.349177457 | _Raks01d4 | 0.9604 | 0.0163 | |
| 17 | | | | | | | | | |

Рис. 4.1. Отчет о результатах корреляционных измерений. Под ККФ понимается максимальное значение кросскорреляционной функции.

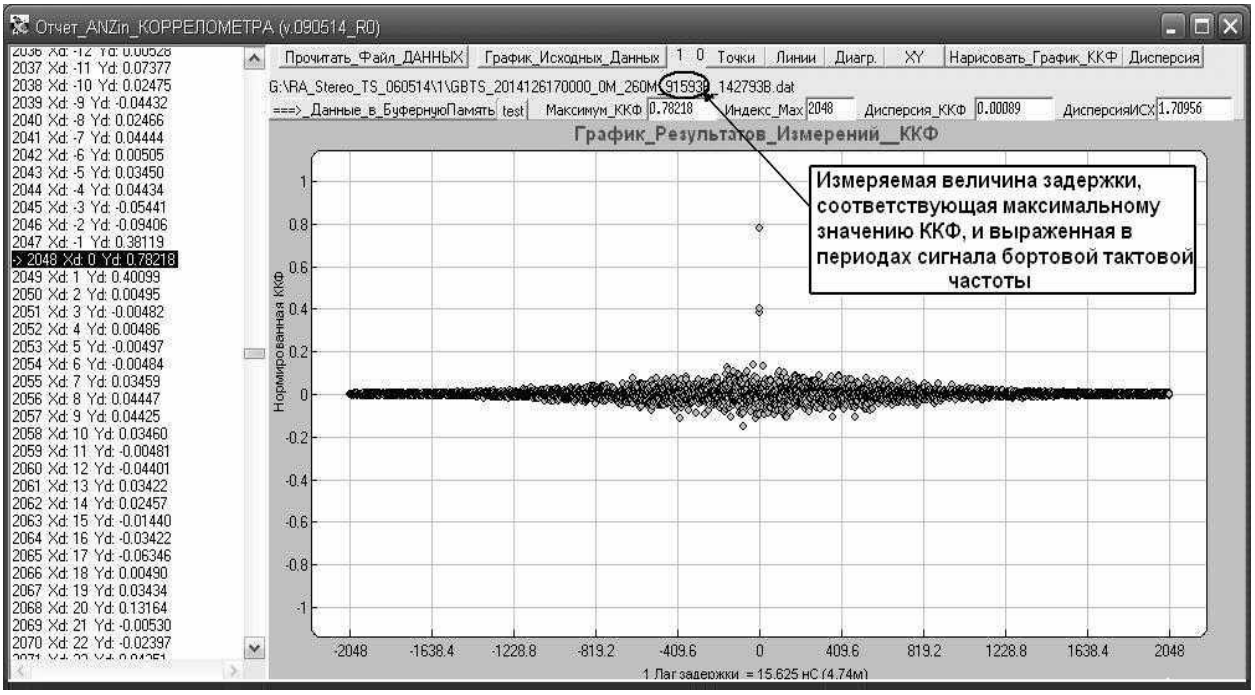


Рис. 4.2. Рабочая панель используемого коррелометра, соответствующая измерению разности хода в стерео эксперименте РСДБ сеанса Raks01d основной научной программы проекта “РадиоАстрон”

## 5. Результаты исследований

### 5.1. Результаты измерений разности хода сигналов КРТ к наземным станциям слежения во время сеансов РСДБ.

Начиная с декабря 2013 года по 24 октября 2014 года, было подготовлено 12 стерео экспериментов. Удалось успешно провести и выполнить измерения по 8 стерео экспериментам. Кроме того, появилась возможность селекции качества выполнения экспериментов по характеру возможных измерений в зависимости от качества данных, зарегистрированных “подсматривающей” НСС.

При использовании БКШВ необходимо оценивать погрешность синхронизации (невязку) начального сдвига секундных меток БКШВ, относительно ШВ НСС (исходно Пушино). Сверку синхронизации удобно выполнять с использованием секундных меток СЕВ НСС Грин Бэнк. На всем интервале стерео наблюдений операция сверки выполнялась четыре раза. Результаты представлены на рисунке 3.

Символами “- ☆-“ на рисунке 3 представлены результаты разности между измеренными значениями разности хода одного сигнала КРТ к обеим НСС и одномоментными прогнозными значениями разности хода.
Анализ рассматриваемой зависимости разности хода одного сигнала КРТ к обеим НСС позволяет сделать следующие выводы:

- измеренная величина отклонения разности хода отличается от аналогичной расчетной величины в баллистическом прогнозе. Это отличие практически совпадает с разностью хода разностью шкал времени обеих НСС. Сопоставляя разность хода сигнала КРТ с невязкой между ШВ НСС Пущино и ШВ НСС Грин Бэнк, можно заметить существование связи между погрешностью баллистического прогноза и упомянутой невязкой;

- выполнение стерео экспериментов позволило практически оценить качество работы СЕВ НСС в виде локальных поправок на сдвиги РСДБ экспериментов;

- определение локальных поправок двух ШВ НСС позволяет оценить невязку синхронизации БКШВ относительно каждой ШВ НСС и GPS, используя корреляционный метод и данные РСДБ экспериментов.

## 5.2. Результаты наблюдений релятивистского эффекта замедления времени во время полета КРТ (с 65 по 142 виток включительно).

Регистрация эффекта замедления времени на борту КРТ и наблюдение хода БКШВ на интервале исследований позволила установить взаимосвязь между собственной орбитальной скоростью КРТ (тангенциальная компонента скорости) и величиной эффекта замедления времени [3]. В качестве иллюстрации на рисунке 5 представлена тангенциальная компонента скорости КРТ, как функция наблюдаемого эффекта замедления времени для 10 полных витков КРТ (с 96 по 106). На рисунке 6 представлен результат продолжения наблюдений за ходом БКШВ, начатых на предыдущем этапе исследований [3] . Используя значения функции кинематического замедления времени на борту КРТ (рис.5), удалось выполнить преобразования и отождествить измеренные значения орбитальной скорости КРТ с величиной наблюдаемого эффекта кинематического замедления. Для отождествления использовался оригинальный аппаратно–программный акселерометр, входящий в состав измерительного комплекса “КОРВЕТ-Р”

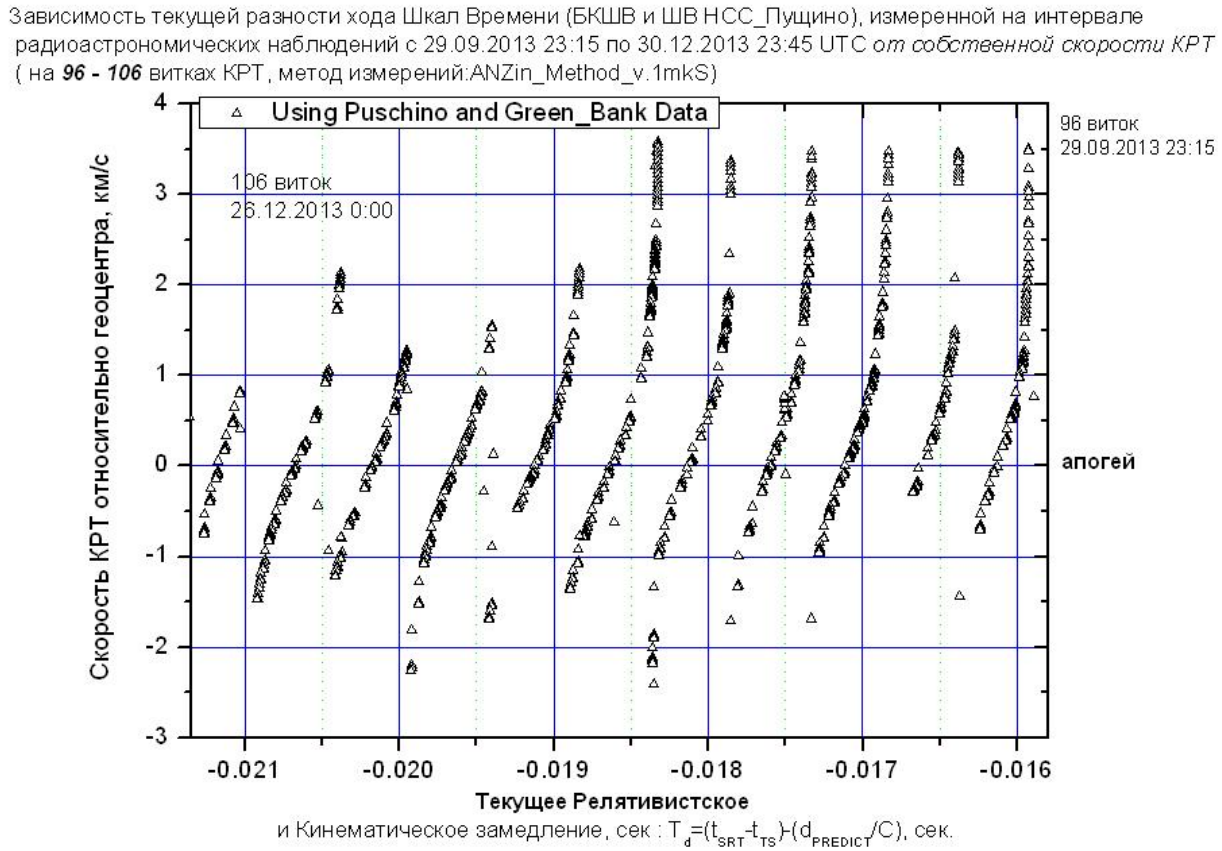


Рис.5

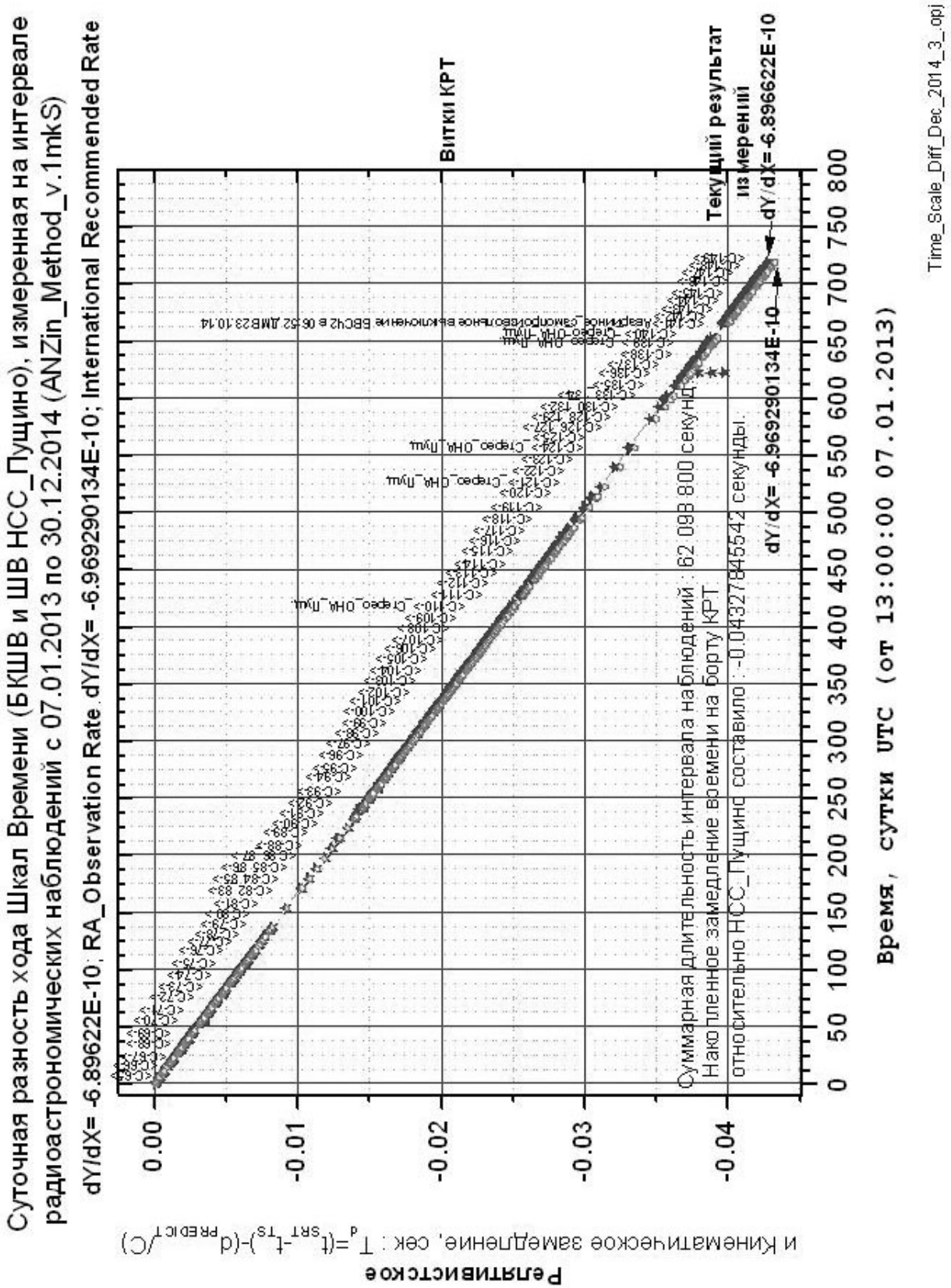
Суточная разность хода Шкал Времени (БКШВ и ШВ НСС_Пущино), измеренная на интервале радиоастрономических наблюдений с 07.01.2013 по 30.12.2014 (ANZin_Method_v.1mkS)
dY/dX= -6.89622E-10; RA_Observation Rate dY/dX= -6.969290134E-10; International Recommended Rate
Витки КРТ
Текущий результат измерений
dY/dX= -6.896622E-10
dY/dX= -6.969290134E-10
Суммарная длительность интервала наблюдений : 62 093 800 секунд
Накопленное замедление времени на борту КРТ
относительно НСС_Пущино составило : -0.0432784554 2 секунды.
Time_Scale_Diff_Dec_2014_3_.opj
Время, сутки UTC (от 13:00:00 07.01.2013)
0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500 550 600 650 700 750 800
0.00
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
Релятивистское и кинематическое замедление, сек : Td=(tSRT-tTS)-(dPREDICT/C)

Рис.6

Полученная взаимосвязь орбитальной скорости КРТ с производной от функции кинематического замедления (рис.5) позволила дополнить измерительный комплекс технологической схемой. Упомянутая схема используется для измерения пространственной зависимости значений производной функции кинематического замедления. Полученные таким образом значения производной обеспечивают контроль за работой счетчиков – интеграторов измерительного комплекса. Ниже рассмотрен вариант использования результатов работы счетчиков – интеграторов.

Согласно теории относительности, ход времени в собственной координатной системе спутника отличается от хода в земной системе из-за разницы гравитационных потенциалов и из-за движения спутника [ 9 ]. Для спутников GPS, например, это приводит к смещению частоты его базового генератора, которое можно рассчитать по формуле:

$$\Delta f_{ref} = \frac{f_S - f_O}{f_O} = \frac{1}{2} * \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \frac{\mu}{c^2} * \left[\frac{1}{R_{E_c} + h} - \frac{1}{R_{E_c}}\right], \quad (10)$$

где

$\mu$ = $G \times M_{Å}$ = 3986005 $\times 10^8$ м$^3$/с$^2$ – геоцентрическая гравитационная постоянная Земли;

$V$- скорость спутника;

$h$- высота спутника над земной поверхностью;

$f_S$ - частота, сформированная на спутнике;

$f_o$ - частота, принятая на Земле.

Поскольку упомянутый сдвиг частоты зависит от двух параметров,- скорости и дальности, то для корректной оценки эффекта замедления времени необходимо определить вклад каждой из двух компонент.

Один из способов решения поставленной задачи состоит в конструировании схемы измерений, обеспечивающей “псевдонеподвижность” КРТ относительно наземного наблюдателя. Использование представленной выше технологии оценки баллистического прогноза и сопоставления взаимного сдвига квантовых шкал времени позволило продолжить исследования замедления времени на различных участках орбиты КРТ с использованием результатов стерео экспериментов.

## 5.3. Детектирование эффекта замедления времени как функции дальности КРТ от НСС.

Наблюдение за ходом БКШВ позволило оценить эффект замедления времени на различных удалениях КРТ от НСС. В качестве критерия оценки была выбрана зависимость относительного замедления времени от текущей дальности КРТ.

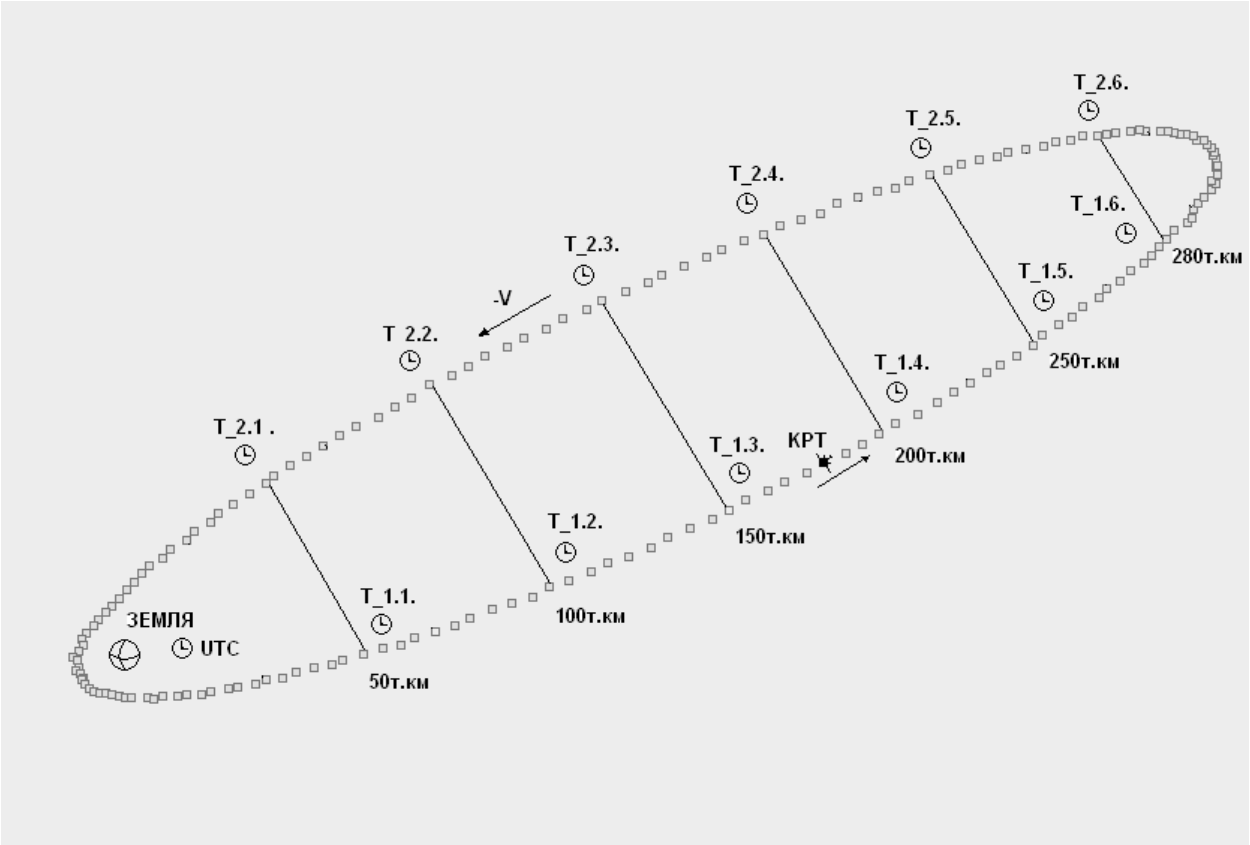


Рис.7

Длительный период работы КРТ на орбите, регулярные РСДБ наблюдения, устойчивая работа оборудования КРТ и наземной инфраструктуры в рассматриваемый период, позволили использовать технологию контрольных точек на орбите КРТ. Упомянутая технология предполагает условное размещение измерительных средств в виде пространственно - распределенных счетчиков-интеграторов с индикаторными циферблатами БКШВ. Наблюдение эффекта гравитационного замедления времени на борту КРТ предполагает неподвижность всех измерительных средств относительно наземного наблюдателя [9]. Рассматриваемая технология предполагает пространственную стабилизацию (“условная неподвижность”) всех счетчиков-интеграторов по трем параметрам, таким как барицентрическая навигационная задержка, навигационная задержка и радиальная скорость КРТ относительно НСС [2]. Функция каждого счетчика состоит в накапливании величины $\Delta\tau/\Delta T$, которая рассчитывается по результатам измерений, представленных на рисунке 6. В основе используемой технологии лежит имитационная модель бортовых

атомных часов (ИМБАЧ), которая была рассмотрена на предыдущем этапе исследований [2].

Используемая технология предполагала измерение 5-и физических величин:

- $\Delta\tau$ - изменение величины интервала времени между фронтами сигналов секундных меток БКШВ и ШВ НСС с учетом величины текущей навигационной задержки;
- $\Delta T$ – интервал времени по ШВ НСС между двумя последовательными считываниями показаний одного конкретного счетчика;
- $R_{Ec}$ – дистанция между барицентром Земли и точкой “условной неподвижности” каждого счетчика-интегратора с соответствующим циферблатом;
- $R_i$ – дистанция между НСС и точкой “условной неподвижности” каждого счетчика-интегратора с соответствующим циферблатом;
- $Vr_i$ – радиальная скорость КРТ относительно НСС в точке “условной неподвижности” каждого счетчика-интегратора с соответствующим циферблатом;

Последние три измеряемых величины используются в качестве критерия соблюдения “условной неподвижности” и определяют основную погрешность в измерении наблюдаемого эффекта релятивистского замедления времени на борту КРТ. Понятно, что используемая технология пригодна для исследований только в случае периодического обращения КРТ вокруг Земли и интервалом наблюдений охватывающим число пройденных витков много больше 1. Чем больше витков, тем выше точность измерений наблюдаемого эффекта при прочих равных условиях. Практическая суть технологии состоит в условном расположении независимых индикаторных циферблатов на условной орбите КРТ с 65 по 142 виток включительно. Каждый циферблат соответствует фиксированной дальности КРТ от НСС. Схема условного расположения 12 ***основных*** циферблатов представлена на рисунке 7. Шесть пар циферблатов позиционированы на шести фиксированных дистанциях КРТ от НСС. Индексы циферблатов 1.x относятся дистанциям относительно НСС Пущино, индексы 2.x относятся к дистанциям относительно НСС Грин Бэнк. В каждой паре циферблатов элемент с индексом 1.x относится к восходящему участку орбиты (удаление от НСС), а элемент с индексом 2.x относится к нисходящему участку орбиты (приближение к НСС). Из всего массива в 1329 сеансов РСДБ наблюдений за период с 07.01.2013 по 24.10.2014, были выделены 12 групп показаний БКШВ, соответствующих всем выбранным дальностям. Общий объем показаний замедления БКШВ составил 3847 измерений. Селекция результатов измерений в каждую группу выполнялась исходя из допуска +/-300 метров по значению дальности КРТ и +/- 1 м/с по значению радиальной скорости КРТ относительно НСС. Параметры $R_{Ec}$ служили в качестве контрольных меток, которые извлекались из результатов баллистического прогноза. Отметим, что

шкала времени баллистического прогноза имела постоянный сдвиг, опережая сигналы ШВ UTC примерно на 10 микросекунд.

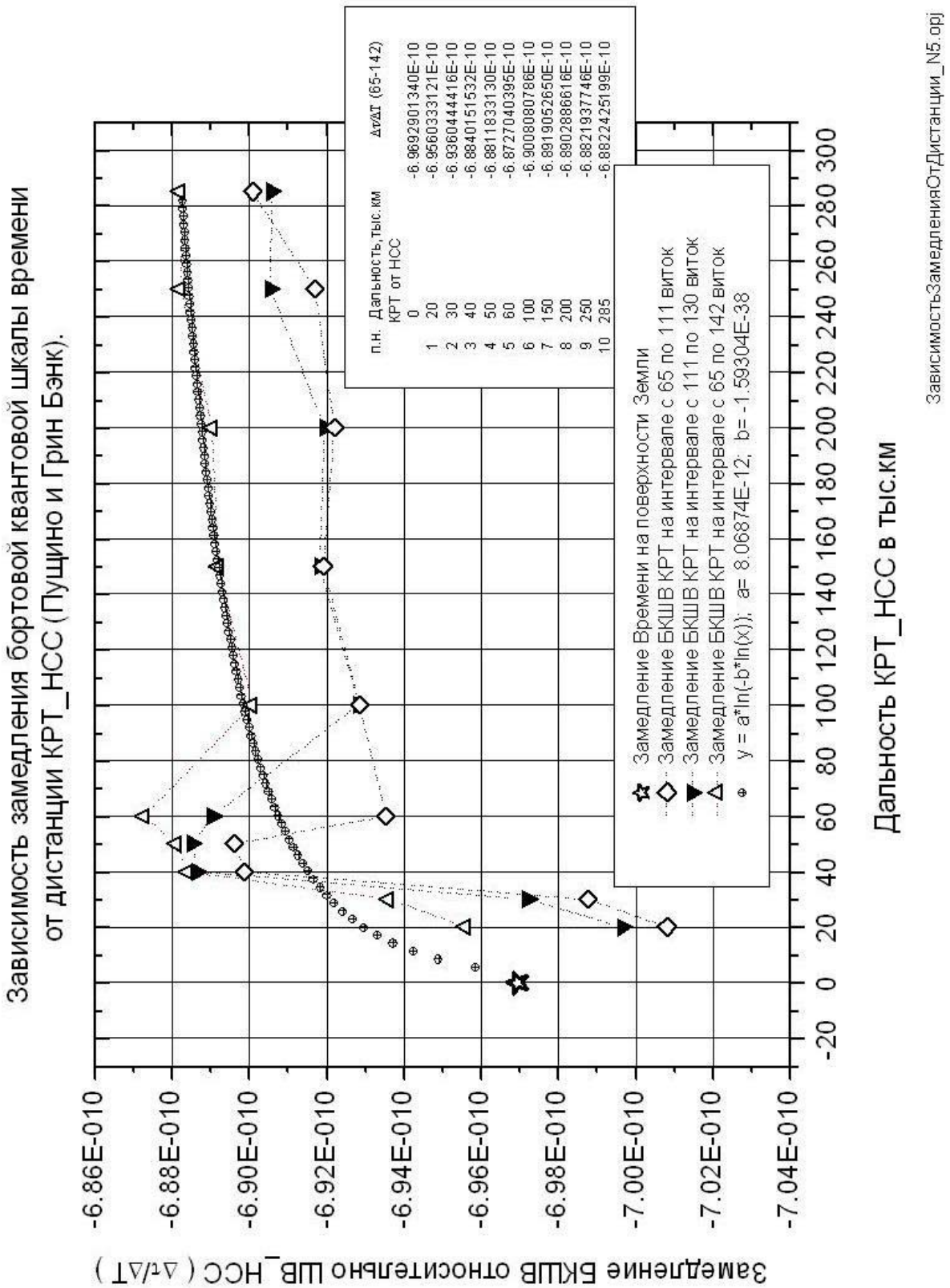


Рис.8

Разрешающая способность каждого циферблата составляла 62.5 нс. Погрешность синхронизации счетчиков-интеграторов БКШВ относительно ШВ НСС Грин Бэнк составляла +/- 18 нс. Аналогичная погрешность синхронизации БКШВ относительно ШВ НСС Пущино составляла +/- 31 нс. В схемы счетчиков-интеграторов были встроены компенсаторы измеренных разностей ходов ШВ НСС (см.рис.3) для каждой из двух групп циферблатов, соответственно. Погрешность баллистического прогноза, используемого в МБАЧ, нивелировалась результатами прямых измерений разности хода сигнала КРТ к обеим НСС. Отличительное достоинство использования результатов стерео экспериментов состоит в том, что появилась возможность ***одновременной (по дате БШВ)*** и синхронной (по сигналам секундных меток форматора КРТ) сверки разности хода исследуемых шкал времени. Это обстоятельство обеспечивает снижение погрешности и неопределенностей при измерениях **$\Delta\tau$.** Интегральный результат измерений по каждой группе циферблатов представлен на рисунке 8 в виде зависимости относительного замедления БКШВ $\Delta\tau/\Delta T$ от дальности КРТ. Дополнительно для контроля были использованы еще четыре пробных циферблата на дальностях 20т.км, 30т.км, 40т.км, 50т.км. Однако, ввиду эволюции орбиты КРТ и уменьшения дальности перицентра от поверхности Земли надежность полученных результатов существенно снижена.

По виду зависимости, представленной на рисунке 8, можно сделать вывод о положительном детектировании эффекта замедления времени и о характере его уменьшения с увеличением дальности. Оценивая полученный результат можно заметить, что для рассматриваемого диапазона дальностей (до 300 тыс.км. от Земли) весь диапазон изменения $\Delta\tau/\Delta T$ не превысил величину $1.0*10^{-11}$ . Одновременно следует заметить, что сопоставление полученных результатов с результатами теоретических исследований в рамках ОТО и СТО является самостоятельной задачей, выходящей за рамки настоящих исследований. Отметим, что в представленных результатах присутствуют компоненты, значимость которых не оценивалась. К таким компонентам мы относим, в первую очередь, влияние ионосферы, магнитосферы, Солнечную активность, неравномерность вращения Земли и естественную убыль запаса молекулярного водорода в БВСЧ-2. Как видно из рисунка 8, количество витков КРТ, используемых для измерений, существенно изменяет величину детектируемого эффекта. При этом характер зависимости замедления от дальности КРТ ***остается прежним***. Значительное отклонение значений результатов измерений на малых дальностях вероятно обусловлен эволюцией орбиты КРТ и влиянием радиационных поясов Земли на работу БВСЧ при прохождении через них КРТ.

## 5.4. Дополнительные эффекты, обнаруженные во время настоящих исследований.

В КРТ проекта “РадиоАстрон” в качестве БВСЧ-2 используется водородный стандарт типа VCH-1010 (разработчик и изготовитель ЗАО “Время-Ч”, Нижний Новгород). Отличительная особенность конструкции VCH-1010 состоит в отсутствии вакуумных насосов. В целях повышения экономичности прибора для обеспечения вакуума в резонаторе используется вакуумная среда открытого космоса. На рисунке 9 представлена временная диаграмма, иллюстрирующая естественный расход молекулярного водорода, необходимого для работы резонатора БВСЧ-2. Из диаграммы видно, что при уменьшении высоты перигея орбиты КРТ скорость уменьшения давления молекулярного водорода падает. Это явление можно объяснить влиянием верхних слоев атмосферы Земли на работу БВСЧ-2.

С 28 января 2013 года по 24 октября 2014 года непрерывная работа БВСЧ-2 выполнялась без приема телеметрической информации о состоянии прибора из-за сбоя в телеметрической системе (ТМС) КА. Однако, измерения относительной разности опорных частот КРТ и НСС позволили реконструировать величину давления на указанном интервале наблюдений с использованием результатов предполетных исследований [2,3]. Здесь необходимо отметить, что суммарное изменение среднего значения относительной разности частот (за 100 секунд) не превысило $1*10^{-12}$ на всем интервале настоящих исследований, что существенно уже диапазона детектирования эффекта замедления времени.

На рисунке 10 представлена аналогичная временная диаграмма, которая иллюстрирует работу ВСЧ активного типа модели VCH-1005 [12]. ВСЧ этого типа использовались НСС Пущино в 2011 – 2013 годах для работы в рамках проекта “РадиоАстрон”. Обе диаграммы представлены в сопоставимых масштабах и позволяют сравнивать работу однотипных ВСЧ на Земле и в космосе. Сопоставляя представленные диаграммы отметим существенное отличие. На диаграмме БВСЧ-2 заметны изменения в скорости снижения давления на участках, соответствующих снижению перицентра орбиты КА до ~800 – 900 км. Есть основания полагать, что верхние слои атмосферы Земли влияют на работу БВСЧ-2 в обозначенных на рис. 9 интервалах.

Анализируя вспомогательные результаты наблюдений за работой энергетической установки КРТ, и сопоставляя результаты баллистических измерений, можно предположить, что значительный разброс значений $\Delta\tau/\Delta T$ на малых дальностях обусловлен прохождением КРТ через радиационные пояса Земли (пояса Ван-Аллена). Внутренний пояс находится на высоте от 3 до 12 тыс.км над поверхностью Земли, а внешний - на высоте от 18 до 57 тысяч км. Внутренний состоит главным образом из протонов, а внешний - из электронов [4,5]. На рисунке 11 представлена временная диаграмма напряжения на выходе солнечных батарей КРТ, охватывающая весь интервал времени непрерывной, стабильной работы БВСЧ-2. Начиная с лета 2013 года, эволюция орбиты КРТ

перешла в фазу снижения перигея. Минимальное значение перигея было достигнуто к январю 2014 года на 110 витке КРТ и составило 7453 км от барицентра Земли (27.01.2014 21:22:01 UTC).

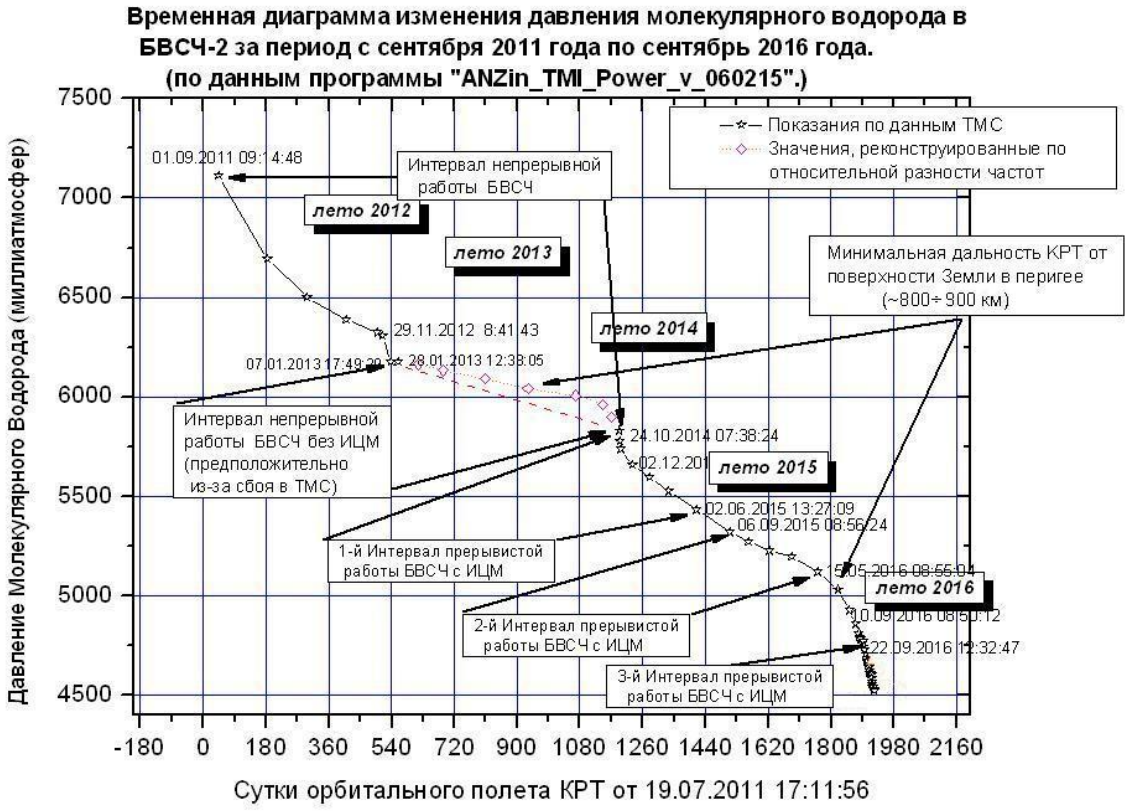


Рис. 9

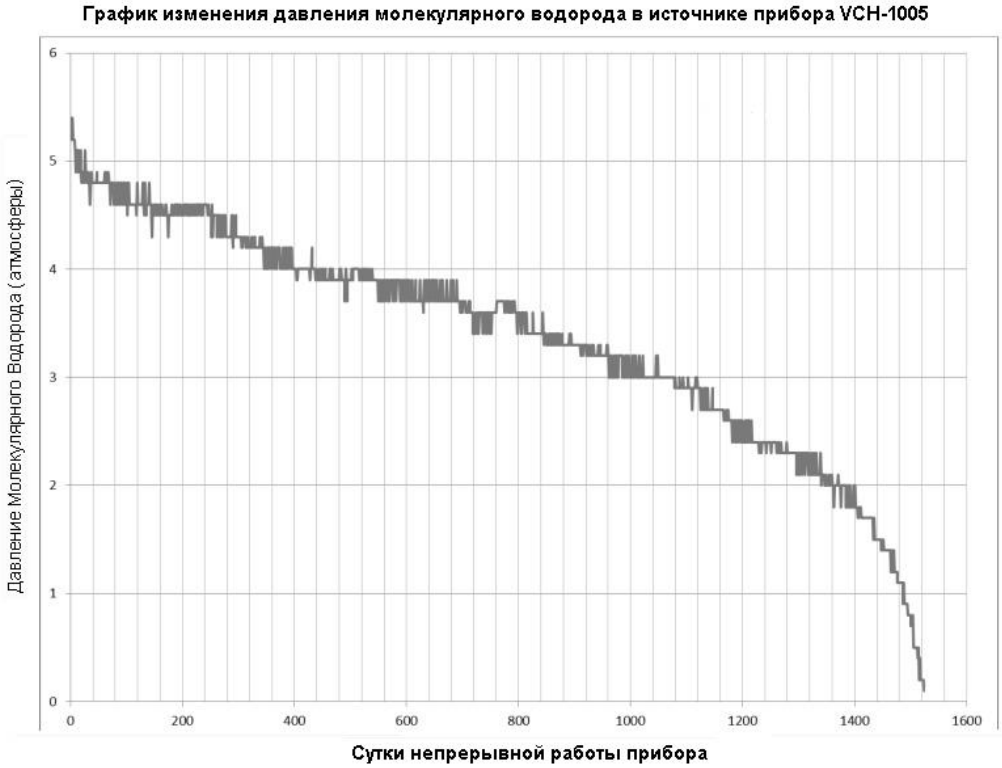


Рис. 10

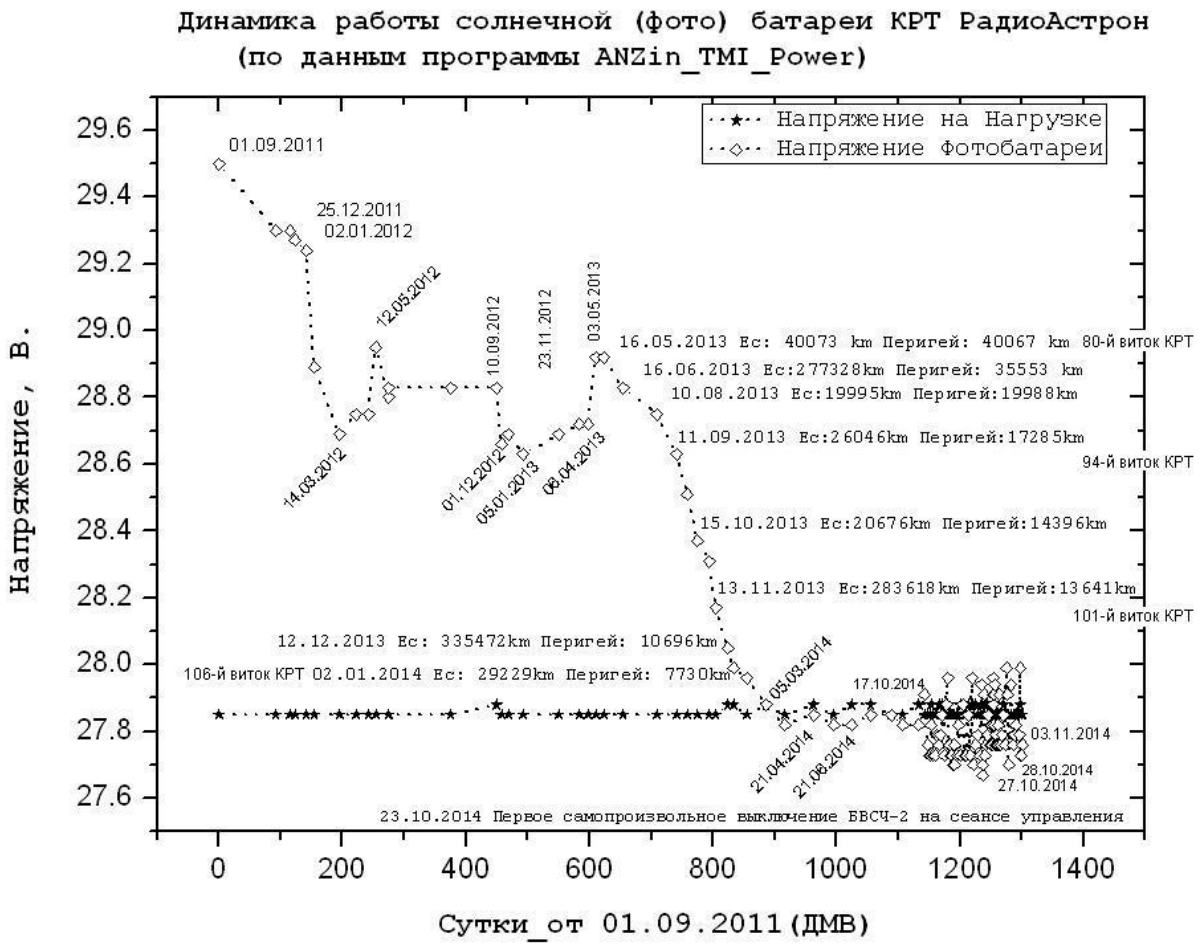


Рис.11

В качестве иллюстрации воздействия радиационных поясов Земли на элементы бортового оборудования КРТ на рисунке 12 условно изображено положение радиационных поясов Земли и показана примерная траектория движения КРТ РадиоАстрон в перигее на 90-м витке. Аналогичная траектория движения КРТ на 120 витке условно представлена на рисунке 13. Эволюция орбиты КРТ на интервале настоящих исследований представлена на рисунке 14 в барицентрических координатах с шагом 10 витков. Отметим, что эволюционирующая орбита КРТ проекта РадиоАстрон на 106 витке (02.01.2014 г.) обеспечивала суммарную экспозицию КРТ во внешнем радиационном поясе, не превышающую 4 часов. Аналогичная величина экспозиции КРТ во внутреннем радиационном поясе не превышала 1.7 часа. Сопоставляя текущий период обращения КРТ ( 211.2 час.) с длительность экспозиций, заметим, что они не превышают 2 % для внешнего, и 0.8 % периода для внутреннего радиационных поясов соответственно. В качестве шаблона для рисунков 10 и 11 использован рисунок Elizabeth Morales, находящийся в открытом доступе по адресу http://coldrentnbinah.blogspot.ru/2010/06/van-allen-belt.html.

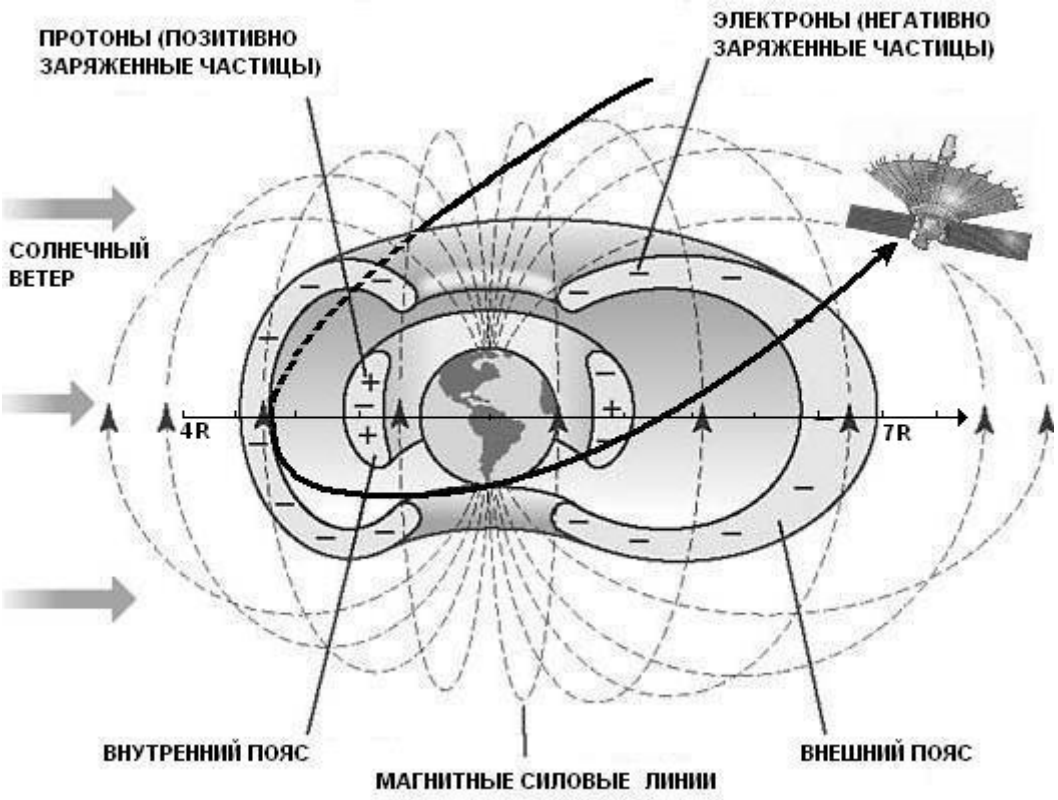
ПРОТОНЫ (ПОЗИТИВНО ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ)
ЭЛЕКТРОНЫ (НЕГАТИВНО ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ)
СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР
4R
7R
ВНУТРЕННИЙ ПОЯС
МАГНИТНЫЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ
ВНЕШНИЙ ПОЯС

Рис.12

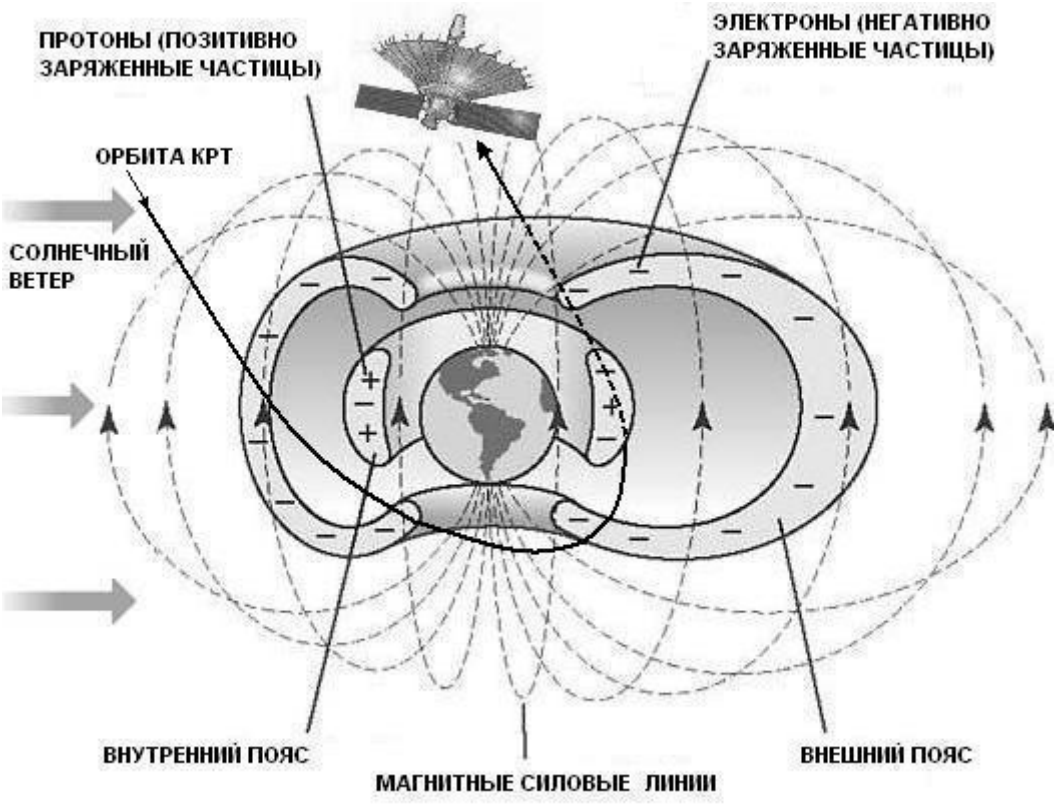
ПРОТОНЫ (ПОЗИТИВНО ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ)
ЭЛЕКТРОНЫ (НЕГАТИВНО ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ)
ОРБИТА КРТ
СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР
ВНУТРЕННИЙ ПОЯС
МАГНИТНЫЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ
ВНЕШНИЙ ПОЯС

Рис.13

Все измерения и расчеты настоящих исследований выполнены с учетом положений принятых в Национальном стандарте Российской Федерации [11].

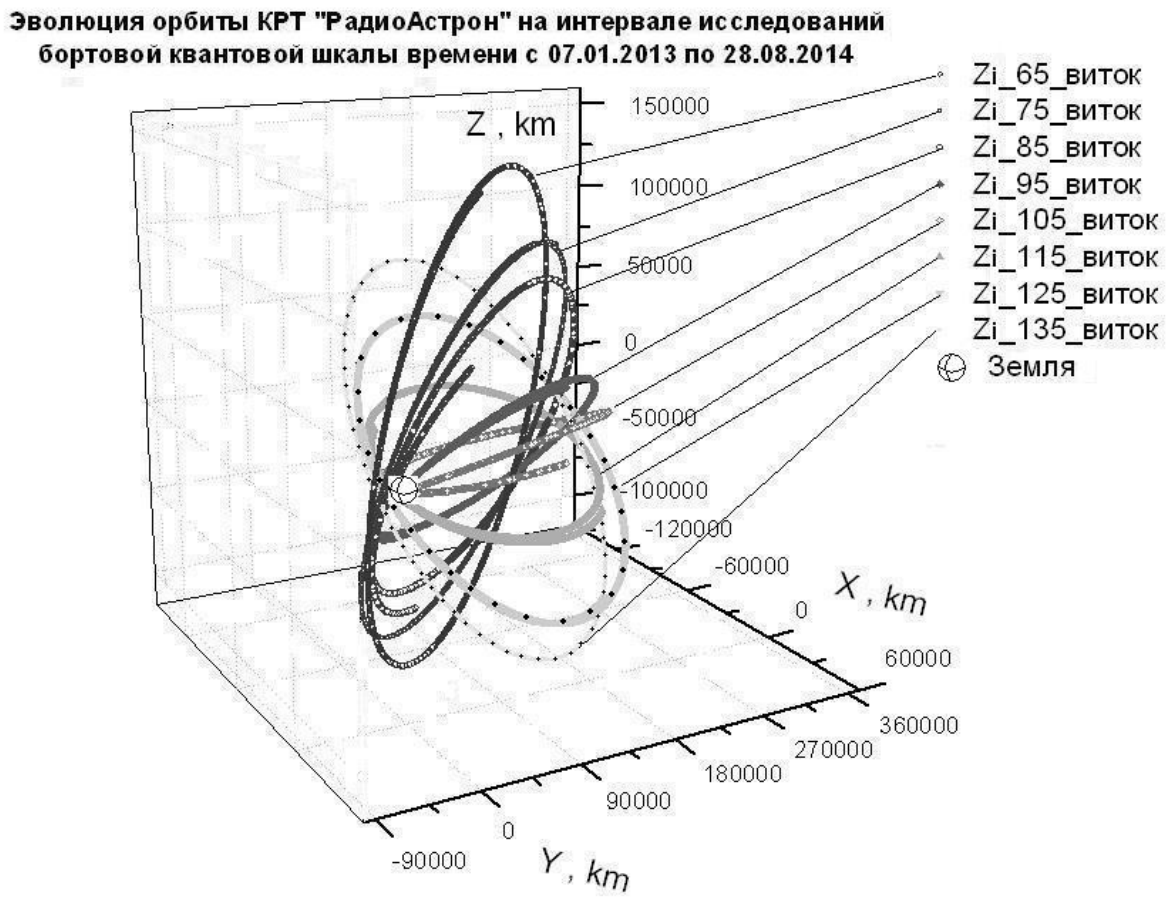


Рис.14

## 6. Выводы и обнаруженные эффекты

1. Выполнение измерений с использованием стерео эксперимента можно считать успешным, если обе НСС приняли сигнал КРТ с уровнем отношения сигнал/шум S/N >5 db, (BER < 0.3); при SNR >9.5 db появляется дополнительная возможность измерения взаимных сдвигов между всеми используемыми шкалами времени (БШВ, БКШВ, ШВ_НСС_Пущино, ШВ_НСС_Грин_Бэнк).
2. Разрешающая способность корреляционного метода измерений разности хода с использованием результатов стерео эксперимента, не превышает 5 метров. Относительная погрешность измерений не хуже 0.1%.
3. Результаты измерений, с использованием стерео эксперимента, не содержат дополнительных ошибок, связанных с синхронизацией шкал времени сторонних измерительных систем (лазерная дальнометрия, радиотехнические методы измерения дальности).
4. Все изменения и результаты настоящего,- третьего этапа исследований получены на интервале непрерывной работы бортового квантового генератора БВСЧ-2 типа VCH-1010 N005 с 09 сентября 2011 года по 24 октября 2014 года.
5. Отметим, что значительная погрешность измерений $\Delta\tau/\Delta T$ на малых дальностях КРТ обусловлена ограничением ( 7 ) на выполнение стерео экспериментов и отсутствием оценки баллистического прогноза в рамках решаемой задачи. Попытки выполнить стерео эксперимента за пределами соотношения ( 7 ) привели к резкому снижению отношения сигнал/шум (на дальности 160 тыс. км примерно в 10 раз) на НСС Грин Бэнк. Как следствие, - регистрация РСДБ -данных на этой НСС оказалась невозможной из-за отсутствия корректной синхронизации, необходимой для устойчивой работы регистрационно - декодирующего оборудования проекта “РадиоАстрон”.
6. Представляет интерес определение времени экспозиции в зоне радиационных поясов и зависимость деградации элементов КРТ от радиационного воздействия.
7. Представляет интерес метод сопоставления результатов измерений замедления времени, полученных в режиме непрерывной работы БВСЧ-2, с аналогичными результатами замедления в прерывистом режиме работы БВСЧ-2, который начался с 25 октября 2014 года.
8. Результаты РСДБ- наблюдений, выполненных во время стерео экспериментов, можно использовать для оценки точности наведения ОНА КРТ.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Подводя итог, отметим, что изложенное выше, относится режиму непрерывной работы БВСЧ-2 и непрерывному формированию БКШВ. Работа в этом непрерывном режиме обеспечивалась радиоэлектронным комплексом космического аппарата в период с 13:00:00 7 января 2013 года по 06:52:03 23 октября 2014 года, что соответствует полету КРТ на интервале с 65 по 141 виток орбиты включительно (в нотации витков принятых в [10]).

Режим непрерывного формирования БКШВ обеспечивался с момента начала формирования и синхронизации БКШВ с ШВ НСС Пущино до момента самопроизвольного (несанкционированного) выключения БВСЧ-2. Очевидная причина начала самопроизвольных выключений БВСЧ-2 состоит в общей деградации энергетической установки космического аппарата КРТ. К октябрю 2016 года дефицит мощности, необходимой для непрерывной работы БВСЧ-2, достиг 70 ватт (т.е. около 10% от общей потребляемой мощности). Как следует из рисунка 8, существенная деградация коснулась фото батарей КРТ. Дальнейшая эксплуатация КРТ показала, что все самопроизвольные выключения БВСЧ-2 сопровождали сеансы управления космическим аппаратом КРТ. Упомянутые сеансы управления, на которых наблюдалось самопроизвольное выключение БВСЧ-2, выполнялись с использованием передатчиков N1 и N2 бортовой телеметрической системы (ТМС). Продолжение исследований, в условиях прерывающейся БКШВ, потребовало внесение конструктивных изменений в используемые измерительные средства.

Практическое использование результатов стерео экспериментов позволяет выполнять дополнительную диагностику оборудования научного комплекса и однозначно отождествлять погрешности в работе для бортового и наземного сегментов инфраструктуры проекта “РадиоАстрон” в целом.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарят за помощь при подготовке и проведении настоящих исследований Попова Михаила Васильевича и Якимова Владимира Евгеньевича.

Проведение настоящих исследований было бы невозможно без самоотверженного труда группы технического обеспечения АКЦ ФИАН проекта “РадиоАстрон” в составе: Новикова Бориса Сергеевича, Бирюкова Александра Владимировича, Копелянского Георгия Даниловича, Мизякиной Татьяны Ариевны и Белоусова Константина Георгиевича.

Авторы благодарны за высококвалифицированную поддержку навигационного обеспечения проекта “РадиоАстрон” сотрудникам НСС Пущино, НСС Грин Бэнк, НПО им. С.А. Лавочкина, Института Прикладной Математики Российской Академии Наук и ЗАО “Время-Ч” .

## 8. ЛИТЕРАТУРА.


1. *Войнаков С.М., Филиппова, Е.Н., Шейхет А.И., Якимов В. Е.*Функциональные ограничения на ориентацию бортовых и наземных средств в проекте "РАДИОАСТРОН". Космические исследования, **52**, 408 (2014)
2. *Зиновьев А.Н.* Результаты исследований наземной и бортовой квантовых шкал времени в условиях орбитального полета космического радиотелескопа проекта “РАДИОАСТРОН”// ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАУКИ (АСТРОФИЗИКА), Препринт N14, ФИАН, 2013.
3. *Зиновьев А.Н.* Результаты исследований двух водородных стандартов частоты типа VCH-1010 проекта “РАДИОАСТРОН” в лабораторных условиях. // Препринт N11, ФИАН, 2009.
4. *Вернов С.Н., Чудаков А.Е.* // Успехи физ. наук. 1960. Т. 70, вып. 3. С. 585.
5. *Ван-Аллен Дж.А.* // Там же. С. 715.
6. *Кардашев Н.С., ...Зиновьев А.Н.* и др. “Радиоастрон” – телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты. //Астрономический Журнал. Том 90, N3, 2013, с.179.
7. *Кардашев Н.С., ...Зиновьев А.Н.* и др. Радиоастрон (проект “Спектр-Р”)- радиотелескоп много больше Земли.Основные параметры и испытания. //Вестник ФГУП “НПО им.С.А.Лавочкина”.N3, 2011, с.11.
8. *Якимов В.Е.* Создание и развитие программного комплекса для планирования наблюдений в проекте "Радиоастрон". Космические исследования, **53**, 242 (2015)
9. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. // Москва: Техносфера, 2002.
10. *Зиновьев А.Н.* Исследование бортовой квантовой шкалы времени в условиях орбитального полета космического радиотелескопа проекта “РАДИОАСТРОН”// КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 53, N3, 2015, Май – Июнь, стр. 207.
11. *ГОСТ Р 51794-2008.*Федеральное Агентство по техническому регулированию и метрологии. Национальный стандарт Российской Федерации. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразования координат определяемых точек.// Москва: Стандартинформ, 2008.
12. *Сахаров Б.А., Медведев С.Ю.* Технический отчет по 2 этапу работ по теме “Участие в выполнении Программы научных исследований в части сопровождения работы приборов БВСЧ” (*проект РАДИОАСТРОН*). ЗАО “Время-Ч”. Нижний Новгород, 2016.



к.т.н., ст.научн. сотрудник АКЦ ФИАН Зиновьев А.Н. (anzin@asc.rssi.ru)
к.ф-м.н. зав. Отделом ПРАО АКЦ ФИАН Коваленко А.В. (kav@mail.prao.ru)

Алексей Николаевич ЗИНОВЬЕВ
Анатолий Васильевич КОВАЛЕНКО

**Технология исследования бортовой квантовой шкалы времени космического радиотелескопа проекта РадиоАстрон с использованием результатов стерео экспериментов в 2013–2014 гг.**

Формат 60x84/16. П. л. 2,5. Тираж 140 экз. Заказ №46
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН
119991 Москва, Ленинский проспект 53