

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ



ПРЕПРИНТ

14

А.Н. ЗИНОВЬЕВ

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАЗЕМНОЙ  
И БОРТОВОЙ КВАНТОВЫХ ШКАЛ ВРЕМЕНИ  
В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА  
КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА ПРОЕКТА  
“РАДИОАСТРОН”**

Москва 2013

## Аннотация

Представлены результаты наблюдений за работой оборудования наземно-космического комплекса проекта “РадиоАстрон” в условиях космического полета. Рассмотрена технология оценки качества информации, принимаемой с борта космического радиотелескопа (КРТ). Определена зависимость показаний бортового счетчика кадров от величины радиальной скорости и дальности КРТ.

Предложена схема измерений параметров выходного сигнала бортового водородного стандарта частоты в условиях космического полета. Опробована технология конструирования модели наземно-космических атомных часов и бортовой квантовой шкалы времени с использованием результатов радиоастрономических наблюдений.

Рассмотрен метод измерения когерентной кумулятивной навигационной задержки при помощи бортовой квантовой шкалы времени. Предложен способ оценки погрешности определения дальности КРТ с использованием результатов измерений когерентной кумулятивной навигационной задержки.

Представлены результаты наблюдений эффекта релятивистского замедления времени. Предложен способ практической оценки величины замедления времени с использованием когерентной кумулятивной навигационной задержки.

На примере тестового сеанса радиоастрономических наблюдений КРТ оценивается величина времени когерентного накопления, которое обеспечивается оборудованием наземно-космического комплекса проекта “РадиоАстрон”.

### **The studies results of terrestrial and onboard quantum time scales during orbital flight of the space radiotelescope "RADIOASTRON" project.**

#### **Abstract**

The technology of information quality estimation for data, accepted from the space radiotelescope (SRT), is submitted. Dependence of the SRT range rate value from the onboard frame number counter is determined.

The measuring chart of onboard H-maser's output signal is presented for the conditions of space flight. The technology model of ground-space atomic clock and onboard quantum timescale (OQTS) is tested with the SRT observations results. The measuring method of coherent cumulative navigation delay (CCND) is considered through OQTS. The estimation of SRT distance error is offered with the use CCND measuring results.

The supervisions results of relativistic effect time deceleration are presented. The way of practical estimation of the deceleration time using CCND is offered.

On the example of the SRT test session observations the value of coherent integration time is estimated. This coherent integration time value is provided by the ground-space complex equipment of "RadioAstron" project.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Перечень обозначений и сокращений	4
2. Введение	5
3. Задачи и объекты исследований	7
4. Методы и инструменты исследований	14
4.1. Технология и схема измерений	14
4.2. Форматор, как первичное бортовое счетное устройство	19
4.3. Способ синтеза Бортовой Квантовой Шкалы Времени	21
5. Результаты исследований	23
5.1. Наблюдение релятивистского эффекта замедления времени во время полета КРТ	23
5.2. Результаты измерений величины разности фаз сигналов 15ГГц	27
5.3. Особенность работы аппаратуры КРТ во время выполнения настоящих исследований	28
6. Выводы по результатам исследований	29
7. Литература	30

## 1. Перечень обозначений и сокращений.

БВСЧ	Бортовой водородный стандарт частоты
БКШВ	Бортовая квантовая шкала времени
БКНА	Бортовой комплекс научной аппаратуры
ВИРК	Высокоскоростной радиоканал
ВСЧ	Водородный стандарт частоты
ГДТ	Главная Диагностическая Таблица Записи Научных Данных
ДрЗЧ	Дрейф значения частоты
ДЗЧ	Действительное значение частоты
КРТ	Космический радиотелескоп
ККНЗ	Когерентная кумулятивная навигационная задержка
МБАЧ	Модель бортовых атомных часов
ОРЧ	Относительная разность частот
НСС ПРАО	Наземная Станция Слежения Пушинской Радио - Астрономической Обсерватории
РСДБ	Радиоинтерферометр со сверхдлинной базой
ЦЗО	Цифровой запоминающий осциллограф

## 2. ВВЕДЕНИЕ.

Работа космического радиотелескопа проекта “РадиоАстрон” состоит в обеспечении функционирования орбитального плеча радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ). Одной из целей РСДБ является изучение строения небесных источников с малыми угловыми размерами, излучающих в радиодиапазоне. В настоящее время достигнутые значения базы, для которых получен отклик интерферометра, превышают 16 диаметров Земли (т.е. более 200 000 км.) [1,2].

Возможности улучшения разрешающей способности интерферометра состоят, с одной стороны, в использовании приемников более высоких частот, а с другой стороны, в разнесении антенн на большие расстояния (базы). Для работы радиотелескопов интерферометра в сантиметровом диапазоне (в частности при  $\lambda = 1.35$  см) необходима высокая стабильность частот опорных генераторов, которая обеспечивает длительное время когерентного накопления информации о принятом сигнале. Длительное время когерентного накопления, в свою очередь, позволяет увеличить чувствительность интерферометра РСДБ [3].

Таким образом, необходимость использования водородных стандартов частоты (ВСЧ) обусловлена высокими требованиями к стабильности выходного сигнала во время наблюдений для обеспечения длительного интервала времени когерентного накопления. Отмеченные условия необходимо соблюдать как на Земле, так и в космосе. По указанным причинам космический радиотелескоп проекта “РадиоАстрон” оснащен высокостабильным источником опорного сигнала - бортовым водородным стандартом частоты (БВСЧ). Экстремальные эксплуатационные условия космического полета подтвердили серьезность технических требований к конструкции БВСЧ.

В цепи радиосигналов, принимаемых радиотелескопами, имеется ряд синхронизируемых устройств, которые необходимо обеспечить выходным сигналом ВСЧ:

- формирователи сетки гетеродинных и тактовых частот радиоприемного тракта радиотелескопа;
- формирователь сигналов местной (локальной) шкалы времени;
- формирователи сигналов для средств регистрации данных радиоастрономических наблюдений и для средств радиотехнических измерений;

Для работы современных наземных радиотелескопов, участвующих в глобальных (как наземных, так и космических) наблюдениях космических радиосточников, кроме ВСЧ необходимы также и шкалы времени, конструируемые на основе сигналов упомянутых стандартов. Шкалы времени используются в качестве инструментов взаимной синхронизации работы радиотелескопов. Эти шкалы времени удобно использовать для измерений задержек в цепях калиброванного приемного оборудования, регистрирующего сигналы радиоастрономи-

ческих источников. В КРТ проекта “РадиоАстрон” прецизионное приемное оборудование расположено на борту спутника, а регистрацию и запись сигналов радиоастрономических источников выполняет наземная станция слежения в г.Пушино (НСС ПРАО).

Координация работ КРТ осуществляется через служебную телеметрическую систему (ТМС), которая в своем составе имеет техническое средство формирование бортовой шкалы времени (БШВ). Опорным сигналом БШВ служат сигналы термостатированного кварцевого генератора, не имеющего связи с БВСЧ. На борту КРТ отсутствуют бортовые атомные часы (БАЧ), работающие от сигналов БВСЧ. Сигналами БВСЧ обеспечивается только первичное пересчетное устройство, - Форматор, которое не синхронизируется ни с Земли, ни от БШВ, ни по времени, ни по частоте (в большинстве экспериментов). Отсутствует возможность выполнения процедуры сверки частот. Сложность создания БАЧ на борту КРТ объясняется двумя причинами:

- до начала полета КРТ не был до конца понятен характер хода времени на борту спутника; были сомнения в возможности выполнения измерений дальности с использованием БВСЧ;
- не было ясности с технологией сверки и синхронизации БАЧ.

Цель настоящей статьи состоит в представлении результатов исследований этих двух проблем и в освещении решенных задач.

### 3. Задачи и объекты исследований.

Начало работы КРТ “РадиоАстрон” на этапе летных испытаний в сентябре 2011 года показало неудовлетворительное качество работы Наземной Станции Слежения ПРАО в части регистрационно-декодирующего оборудования.

Проблема состояла в отсутствии устойчивой синхронизации начала записей регистраторов радиоастрономических сигналов с темпом передаваемого с борта КРТ потока телеметрической информации. Обнаруженные во время реального полета КРТ недостатки упомянутого оборудования наземной станции слежения не были и не могли быть выявлены при наземных испытаниях в условиях неподвижного КРТ.

Таким образом, в начале космических исследований, возникла **первая задача**, которая заключалась в создании надежного способа оценки качества записей сигналов радиоастрономических наблюдений (далее РСДБ наблюдений). В качестве меры оценки качества удалось использовать свойство штатного оборудования КРТ. Это свойство заключается в закономерности изменений показаний счетчика номеров кадров бортового прибора Форматор во время РСДБ наблюдений. Скорость изменения показаний счетчика номеров кадров в регистрируемых НСС записях происходит пропорционально изменению радиальной скорости КРТ. Операцию оценки качества записей удобно выполнять с использованием специализированных устройств [4]. После изготовления специального инструментального монитора было найдено эмпирическое соотношение между периодом изменений показаний счетчика номеров кадров бортового прибора Форматор и средним значением радиальной скорости КРТ на известном интервале времени. Найденная формула и панель монитора представлены ниже (см. рис.1).

$$\mp(Nk_{i+1} - Nk_i) \approx \frac{(T_2 - T_1) \cdot (\pm V_r)}{k_{sc} \cdot \tau_{fr} \cdot C}, \text{ где} \quad (1)$$

$T_1, T_2$  — моменты времени начала приема станцией слежения  $(Nk_i)$  — го и  $(Nk_{i+1})$  —го кадров научных данных соответственно, с;

$\pm V_r$  — среднее значение радиальной скорости КРТ между моментами времени  $T_1$  и  $T_2$ , км/с;

$\tau_{fr}$  — текущая номинальная длительность кадра Форматора, с;

$C$  — скорость света в вакууме, км/с;

$k_{SC}$  – корректирующий коэффициент (примерно равный 1) .  
В настоящей статье принято:

$$k_{SC} = 1 - \frac{F_{\hat{A}\tilde{N}\times} - F_{\hat{A}\tilde{A}\tilde{N}\times}}{F_{\hat{A}\tilde{N}\times}}, \text{ где}$$

$F_{BСЧ}$  - действительное значение частоты опорного сигнала на выходе водородного стандарта частоты наземной станции слежения.

$F_{BVCЧ}$  - действительное значение частоты опорного сигнала на выходе бортового водородного стандарта частоты КРТ “РадиоАстрон”.

Типовой пример: 
$$\frac{(600c) \cdot (1250 м / c)}{1 \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} c \cdot 3 \cdot 10^8 м / c} \approx \boxed{(-) 1.} \quad (2)$$

Это означает, что при удалении КРТ от Земли с радиальной скоростью 1250 метров в секунду периодическая последовательность нумерации кадров Форматора, которая регистрируется НСС, сдвигается на 1 в сторону уменьшения (знак минус в правой части) через каждый интервал времени в 600 секунд по шкале времени наземной станции слежения.

Найденное соотношение позволяет:

- контролировать качество работы регистрационно - декодирующего оборудования;
- измерять радиальную скорость КРТ, используя записи результатов радиоастрономических наблюдений; получаемый результат синхронен и обладает свойством когерентности с наблюдаемыми радиоастрономическими сигналами;
- обеспечивает возможность фазовых измерений между сигналами бортового и наземного стандартов частоты;
- обеспечивает возможность построения бортовой квантовой шкалы времени (БКШВ) на основе сигналов БВСЧ.

На основе найденного соотношения (1) удалось создать процедуру Экспресс - Сканирования записей научных данных. Процедура состоит из 4-х этапов: а) быстрый просмотр содержимого каждой 10-минутной записи сигналов РСДБ наблюдений; б) извлечение из каждой записи всех показаний счетчика номеров кадров прибора Форматор; в) вычисление текущего значения радиальной скорости КРТ; г) вычисление текущего значения Допплеровского сдвига частоты при-



нимаемого сигнала с результатами РСДБ наблюдений. Для обеспечения оперативности и удобства оценки динамики наблюдений по итогам операции Экспресс Сканирования формируется Итоговая Диагностическая Таблица (ИДТ).

В качестве примера ниже, на рисунке 2, последовательно приведены четыре слайда этапов упомянутой процедуры предварительного расчета значений радиальной скорости КРТ по данным ИДТ. На рисунке 2 стрелками показаны связи между используемыми формулами и получаемыми результатами.

В результате проделанной работы по усовершенствованию регистрационно-декодирующего оборудования НСС ПРАО к 09 ноября 2012 года удалось существенно (примерно в 10 раз) снизить число аппаратных сбоев. С этого момента величина потерь не превышает 1.5%, что вполне приемлемо для работы с записями сигналов, принимаемых с борта КРТ. В результате дальнейших исследований была обнаружена связь между показаниями счетчика кадров Форматора и дальностью КРТ относительно НСС ПРАО. На представленных иллюстрациях (рисунок 3 и 4) можно заметить, что форма линейной зависимости показаний счетчика номеров кадров Форматора практически не зависит от величины сидерического периода для текущей эллиптической орбиты КРТ. Наблюдается пропорциональный относительный сдвиг значений нумерации кадров Форматора при изменении величины периода эволюционирующей орбиты КРТ “РадиоАстрон”. Этот факт удалось использовать при создании технологии синтеза БКШВ с использованием записей результатов радиоастрономических наблюдений.

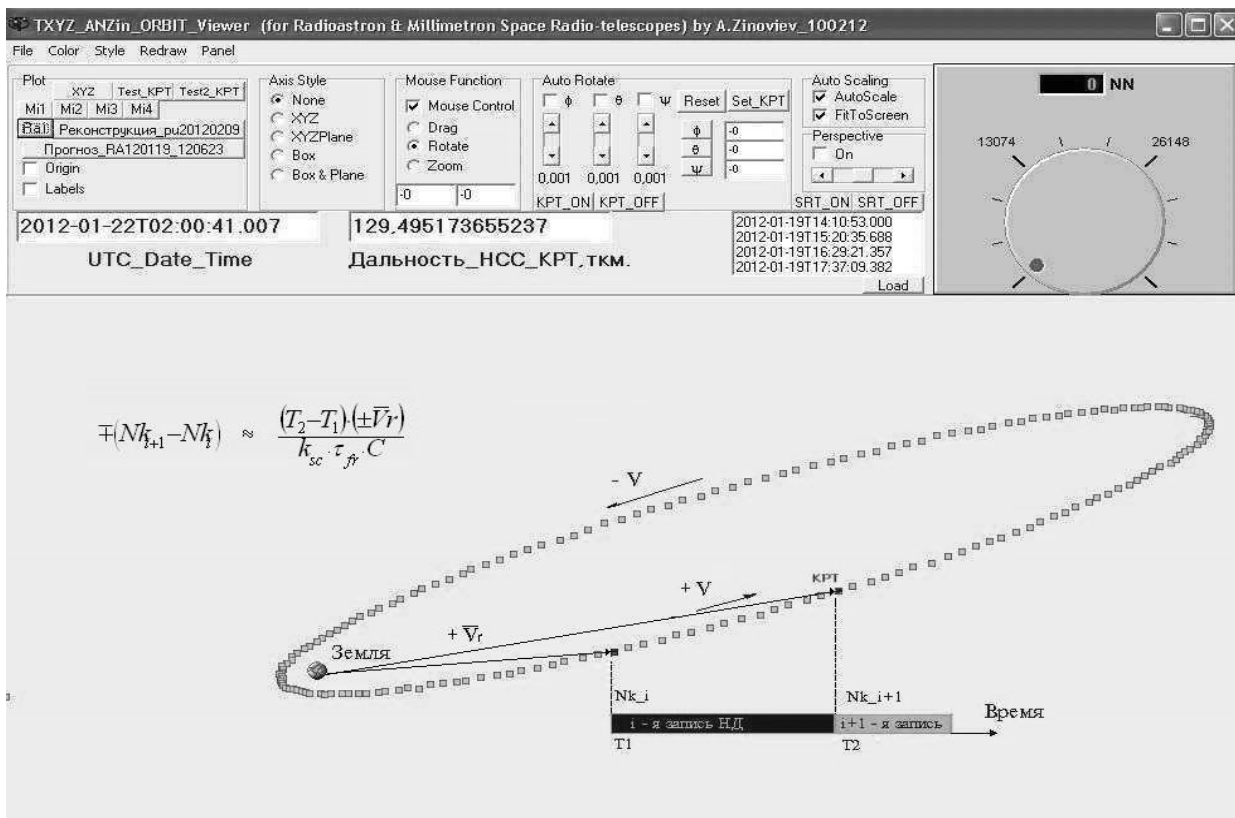


Рис.1

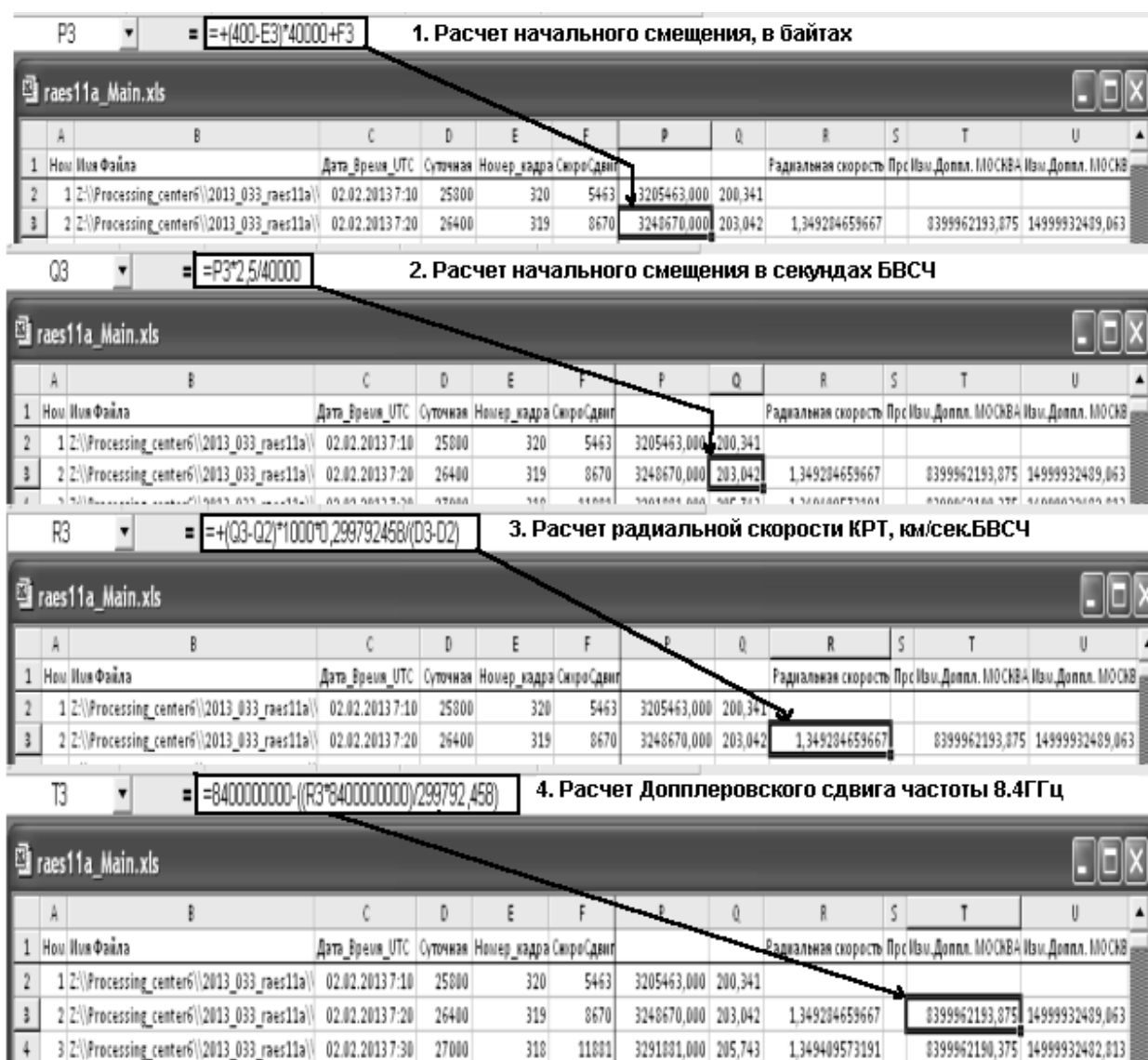


Рис.2

Взаимосвязь между дистанцией КРТ (от НСС Пушино) и номерами кадров Форматора на интервале наблюдений с 07.01.2013 по 14.07.2013

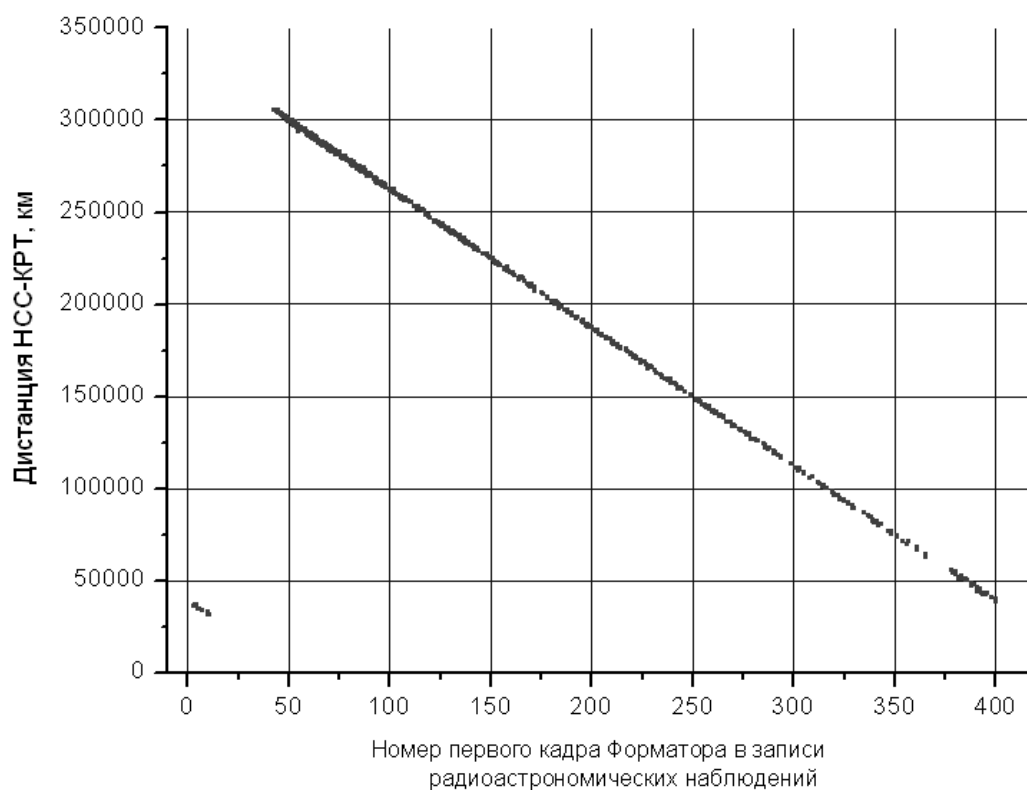


Рис.3

Взаимосвязь между дистанцией КРТ (от НСС Пушино) и номерами кадров Форматора для последовательности витков орбиты КРТ на интервале наблюдений с 07.01.2013 по 14.07.2013

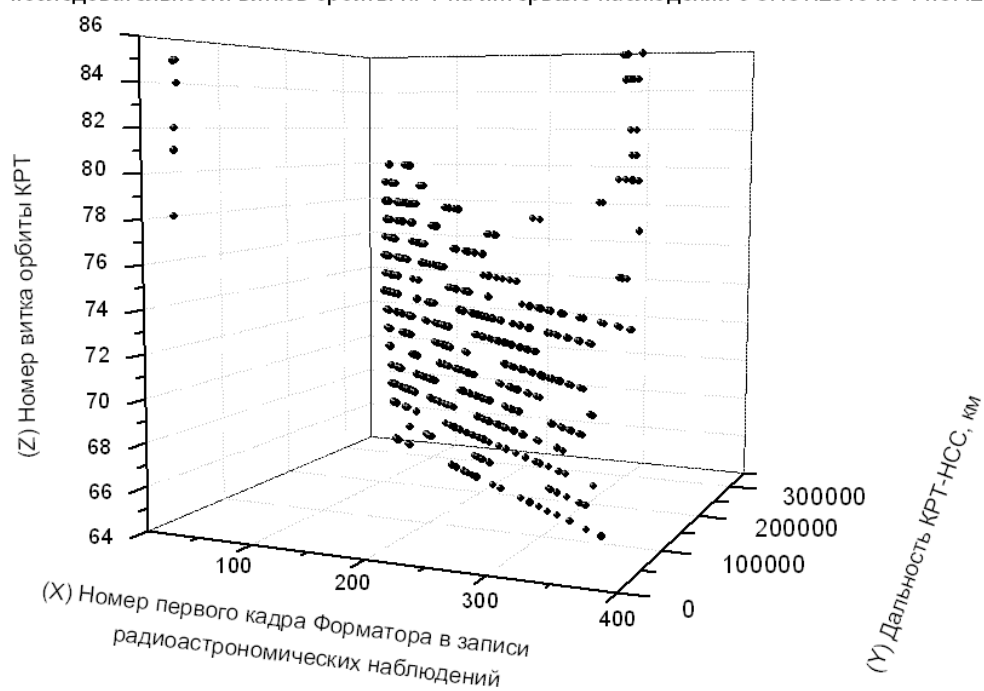


Рис.4

**Вторая задача**, связанная с бортовой шкалой времени, возникла в связи с необходимостью непосредственного контроля действительного значения частоты (ДЗЧ) опорного сигнала БВСЧ. Трудность решения поставленной задачи была связана с двумя обстоятельствами. Во - первых, на борту КРТ отсутствуют полноценные бортовые часы, работающие от сигналов БВСЧ. Во - вторых, информационно-цифровой массив телеметрической информации БВСЧ не содержит информации о текущих значениях частоты выходного опорного сигнала 15 МГц. К решению второй задачи удалось приблизиться путем создания модели бортовых атомных часов (МБАЧ) и искусственного синтеза на Земле Бортовой Квантовой Шкалы Времени (БКШВ), использующей опорный сигнал БВСЧ 15МГц. Суть сконструированной МБАЧ сводится к простой схеме: “работающий маятник часов находится на борту КРТ, а часовой циферблат, часовые стрелки, органы управления и синхронизации находятся на Земле”. Связь часового маятника с часовым циферблатом и часовыми стрелками осуществляется через регулярные 10-минутные записи сигналов радиоастрономических наблюдений. Особенность упомянутых 10-минутных записей, облегчающей взаимодействие элементов схемы МБАЧ, состоит в информационном кворуме (одновременном, синхронном присутствии) сигналов трех независимых шкал времени: Шкалы Времени Наземной Станции Слежения (ШВ НСС ПРАО), служебной Бортовой Шкалы Времени (БШВ) телеметрической системы и БКШВ. Информационный кворум сигналов трех независимых шкал времени позволяет использовать методы сверки и синхронизации часов, разработанных ранее на этапе наземных исследований бортовых водородных стандартов частоты [3]. В частности, для оценки взаимных задержек наиболее востребованным оказался метод трех генераторов.

**Третья задача**, - продолжение второй, возникла уже после создания МБАЧ. Суть третьей прикладной задачи состоит в создании способа измерений навигационной задержки с целью выполнения дополнительных измерений дальности на дистанции КРТ – НСС ПРАО. Практическое решение задачи удалось получить путем дополнительного изготовления измерительного аппаратно-программного комплекса “КОРВЕТ\_Р”. В состав измерительного комплекса вышли: один деконволвер, один трехканальный секвенсор, один юстировочный источник опорного колебания, три синхронметра и один четырехканальный цифровой запоминающий осциллограф. Изготовленный измерительный комплекс, фактически, повторяет технологию измерений представленную в [3] и одновременно выполняет две функции:

- синтезирует сигналы БКШВ;
- измеряет навигационную задержку, используя записи сигналов радиоастрономических наблюдений.

Способ измерений навигационной задержки с использованием результатов радиоастрономических наблюдений обладает существенными преимуществами

перед иными используемыми способами (метод лазерной дальнометрии, радиотехнический метод ответного сигнала и др.), поскольку измеряемая величина находится внутри массива данных, обрабатываемых коррелятором наземно-космического интерферометра. Коррелятор осуществляет поиск характерного момента времени, соответствующего синхронным наблюдениям наземно-космического интерферометра [5,8]. Логично предположить, что использование результатов прямых измерений навигационной задержки, когерентной по отношению к обрабатываемому информационному потоку, существенно облегчает процедуру поиска коррелятора.

В процессе исследования сигналов, принимаемых с борта КРТ, был сконструирован метод измерений когерентной кумулятивной навигационной задержки (ККНЗ).

Термин “кумулятивная” обозначает тот факт, что измеряемая навигационная задержка включает в себя две группы: группу аппаратных задержек и группу эфирных задержек. Результирующая измеряемая величина ККНЗ равна алгебраической сумме всех задержек обеих групп. По результатам выполненных измерений был оценен вклад обеих групп в итоговые значения ККНЗ. Общая аппаратная составляющая ККНЗ не превышает 30 микросекунд времени, и практически не изменялась за все время измерений. Бортовая и наземная составляющие распределились примерно поровну, и составляют:

15 мкс, - для БКНА, включая ВИРК;

14 мкс, - для НСС ПРАО, включая Декодер Научных Данных.

Эфирная группа, включающая в себя задержку распространения сигнала 15 ГГц КРТ в свободном пространстве, тропосферную, ионосферную и др. компоненты, по своему вкладу в ККНЗ занимает превалирующую позицию. За все время полуторалетних измерений величина вклада эфирной группы ККНЗ изменялась в диапазоне от 54 миллисекунд (перигей КРТ) до 1.12 секунды (апогей КРТ).

## **4. Методы и инструменты исследований.**

### **4.1. Технология и схема измерений.**

Для выполнения настоящих исследований была использована функциональная схема, изображенная на рисунке 5.

Представленная схема измерений состоит из космического и наземного сегментов. В правой части рисунка изображен космический сегмент, включающий в себя следующие элементы:

- Бортовой Водородный Стандарт Частоты, являющийся источником опорного сигнала 15 МГц;
- Бортовой формирователь гетеродинных и тактовых частот (БФГТЧ), формирующий из опорного сигнала 15 МГц сигналы гетеродинных частот, в том числе, и сигнал тактовой частоты 72 МГц;
- Прибор П-КРТ-Пр (Форматор), формирующий две двоичных последовательности информационного потока с результатами радиоастрономических наблюдений;
- Высокоскоростной Радиоканал (ВИРК), оснащенный управляемой остронаправленной антенной диаметром 1.5 метра для передачи результатов радиоастрономических наблюдений на наземную станцию слежения. Передатчики ВИРК передают на Землю два сигнала с частотой 15 ГГц и 8.4 ГГц, соответственно. Сигнал 15 ГГц используется для передачи информационного потока с результатами радиоастрономических наблюдений. Сигнал 8.4 ГГц используется для синхронизации и измерений НСС.

На рисунке 6 представлен реальный сигнатурный отклик телеметрической системы КРТ в виде конфигурационной диаграммы (“конфограммы”) состояний приборов БКНА. Приборы, используемые рассматриваемой схемой измерений, отмечены овальными кружками.

На рисунках 7 и 8 представлены текущие термограммы летящего КРТ. Овальными кружками отмечены используемый БВСЧ и Форматор. Все значения температур на термограммах указаны в градусах Цельсия.

В левой части рисунка 5 изображен наземный сегмент, который состоит из следующих элементов:

- Радиотелескоп РТ-22 Пушинской Радиоастрономической Обсерватории;
- Приемник сигналов 15 ГГц (ПРМ-15 ГГц);
- Приемник сигналов 8.4 ГГц (ПРМ-8.4 ГГц);
- Источник опорного сигнала, - водородный стандарт частоты типа VCH-1005. Для синхронизации всего оборудования НСС используется опорный сигнал частоты 5 МГц этого источника;
- Синтезатор 8 ГГц для работы гетеродина 8 ГГц с выходным сигналом приемника ПРМ-8.4 ГГц и синтезатор 400 МГц для работы смесителя и частотомера - измерителя Допплеровского сдвига частоты сигнала 8.4 ГГц.

- Синтезатор 1.860ГГц для работы преобразователя частоты с выходным сигналом 2ГГц приемника ПРМ-15ГГц, и синтезатор 140МГц для работы смесителя и частотомера - измерителя Допплеровского сдвига частоты сигнала 15ГГц;
- Фазовый демодулятор для выделения из принятого сигнала 15ГГц двух двоичных последовательностей информационного потока с результатами радиоастрономических наблюдений и восстановления сигнала тактовой частоты 72МГц;
- Декодер научных данных для восстановления кадровой структуры информационного потока, пригодного для записи регистраторами научных данных;
- Два параллельно работающих регистратора научных данных типа RDR.

Роль выходного элемента схемы измерений выполняет комплекс синхронных измерительных компьютерных программ и измерительных приборов "КОРВЕТ\_Р". Этот комплекс считывает результаты Допплеровских измерений НСС, прогнозные орбитальные данные, данные термограмм КРТ, значений векторов конфограмм БКНА, данные геодинимических измерений и двоичные записи с результатами радиоастрономических наблюдений в виде RDF-файлов. Итоговые результаты работы комплекса формируются в виде различных отчетов. На представленной схеме, в качестве примера, отражены два отчета, имеющие непосредственное отношение к рассматриваемым задачам. Это протокол хода БКШВ и протокол измерений разности фаз (см. рис.12 и рис.14).

Суть метода измерений, на основе которого построены алгоритмы комплекса синхронных измерительных программ, состоит в синхронном сопоставлении двух различных результатов измерений Допплеровского сдвига частоты сигналов 15ГГц. В качестве первого сопоставляемого значения используется результат измерений, полученный частотомерами НСС. Роль источника опорного сигнала частотомеров НСС играет наземный ВСЧ. Для вычисления второго сопоставляемого значения используется величина Допплеровского сдвига частоты, получаемая из записей информационного потока радиоастрономических наблюдений. Опорным источником для сигналов информационного потока радиоастрономических наблюдений является БВСЧ. Все результаты измерений приводятся к реализациям принятого сигнала 15ГГц. Эта процедура позволяет выполнять прямые фазовые измерения между бортовым и наземным опорными сигналами. БВСЧ, как источник исследуемых сигналов, подробно рассмотрен в работах [1,2.,3,6]. Как уже отмечалось, непосредственное наблюдение за параметрами выходных сигналов БВСЧ в условиях космического полета конструкцией КРТ не предусмотрено. По этой причине в настоящих исследованиях, в качестве средства доступа к информации о параметрах выходного сигнала БВСЧ 15МГц, используется комбинация трех упомянутых выше методов:

- метод экспресс – диагностики;
- метод синтеза БКШВ;
- метод измерения разности фаз между опорными сигналами.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ РАСТРОЙКИ БОРТОВОГО ВОДОРОДНОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ КРТ "РАДИОАСТРОН"

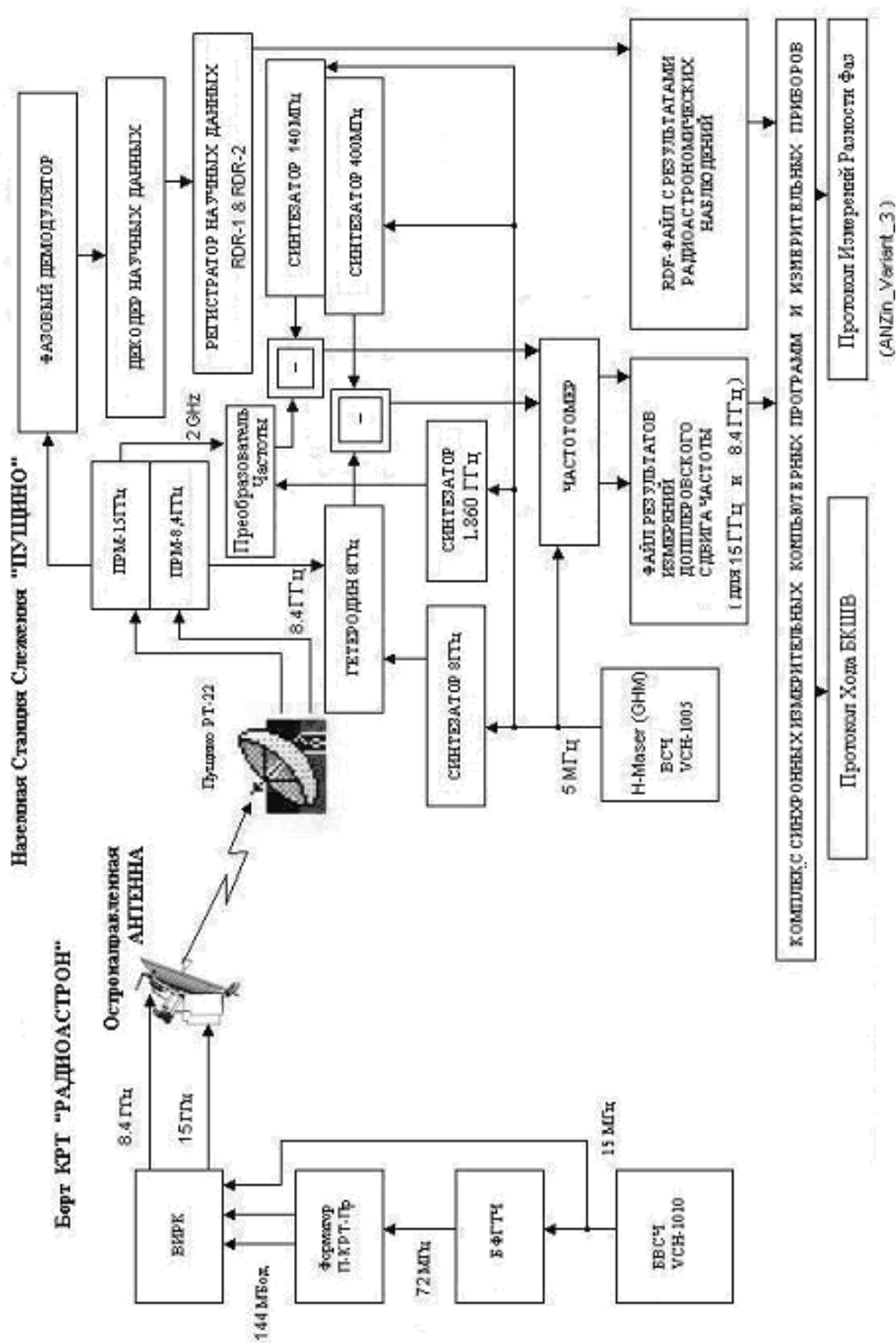


Рис.5



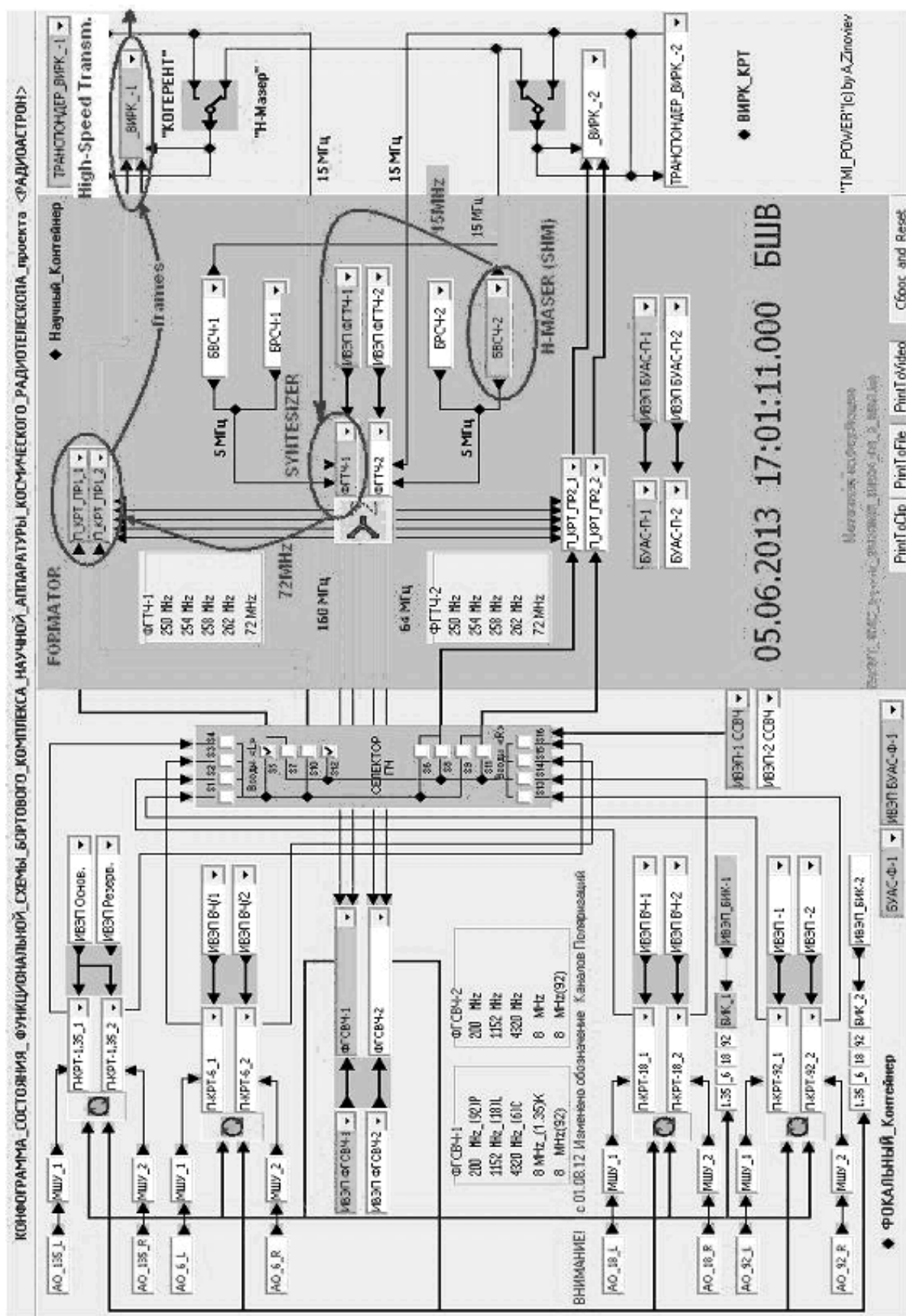


Рис.6

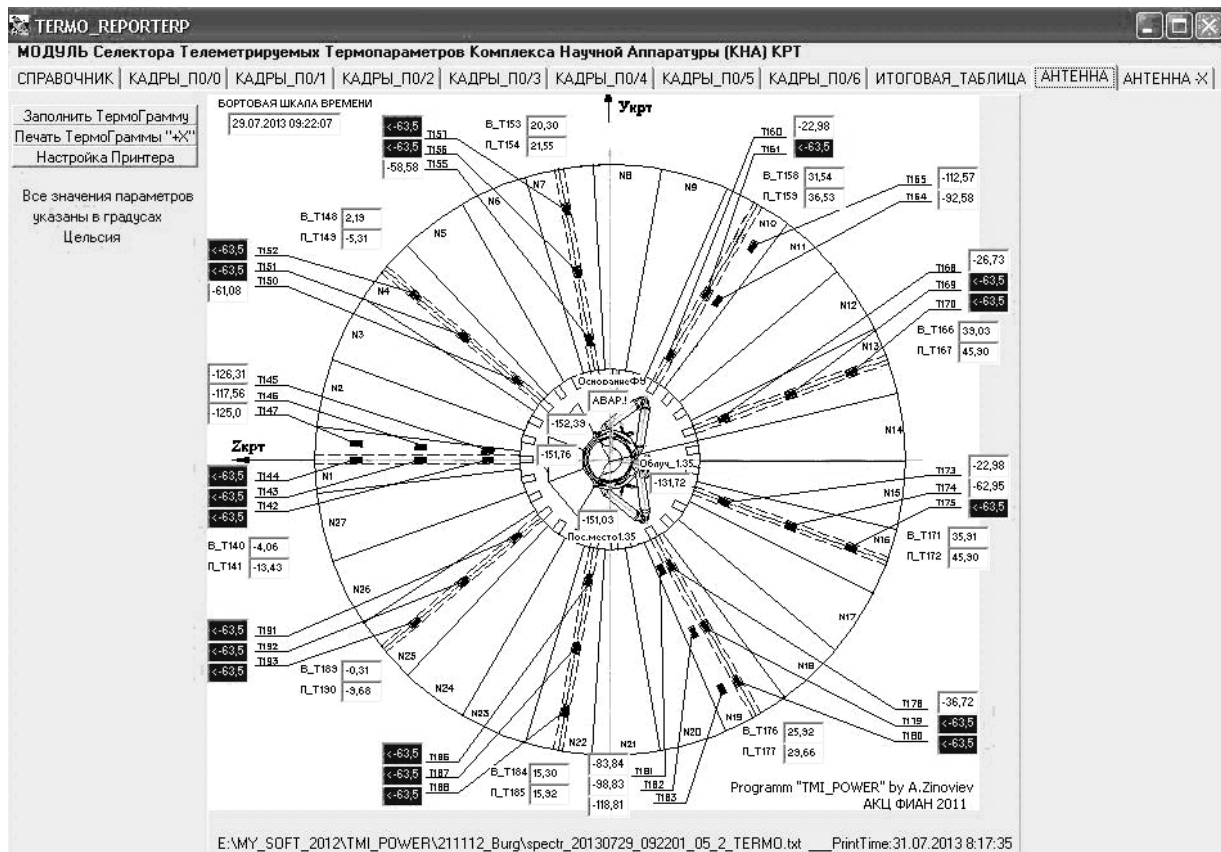


Рис.7

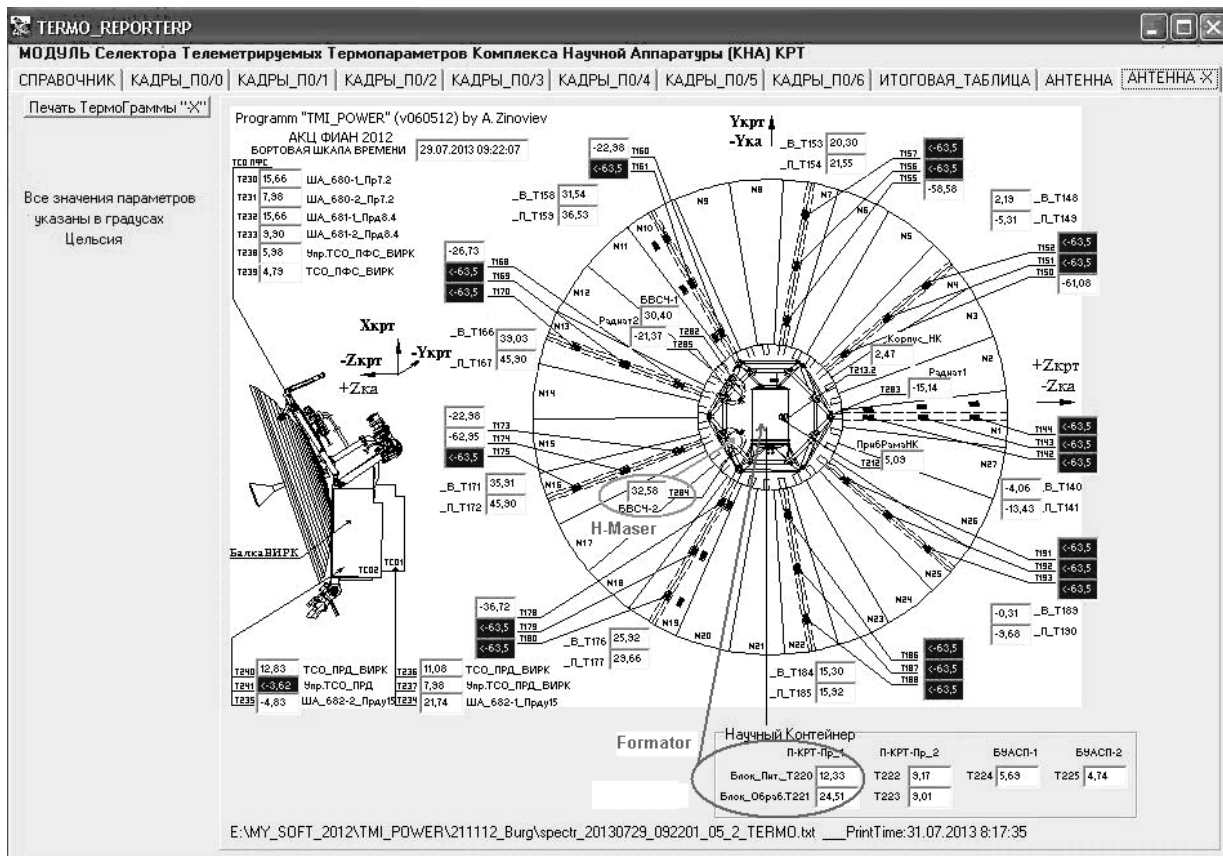


Рис.8

#### 4.2. Форматор, как первичное бортовое счетное устройство.

На бортовой прибор П-КРТ-Пр (Форматор) возложено выполнение трех основных задач:

- перенос спектра сигналов из диапазона промежуточных частот в диапазон видеочастот с формированием верхних и нижних боковых полос видеоспектра;
- оцифровку аналоговых входных сигналов видеоспектра и формирование кадровой структуры выходного информационного потока с результатами радиоастрономических наблюдений для передачи на Землю через ВИРК;
- трансляция данных бортовой телеметрической системы с использованием кадровой структуры выходного информационного потока.

На рисунке 9 представлена структура одного из двух выходных информационных потоков Форматора, подготовленного для передачи через ВИРК (включая телеметрические данные). Подробно формирование сигналов в приборе Форматор рассмотрено в [2].

Применительно к решению рассматриваемых задач необходимо отметить, что в 30-ти байтных заголовках каждого из 400 ежесекундных кадров Форматора содержится информация о состоянии телеметрической системы КРТ. Телеметрическая система функционирует независимо от комплекса научного оборудования КРТ и использует свой собственный источник опорного сигнала (термостатированный кварцевый генератор). Действительное значение частоты этого кварцевого генератора существенно отличается от действительного значения частоты выходного сигнала БВСЧ.

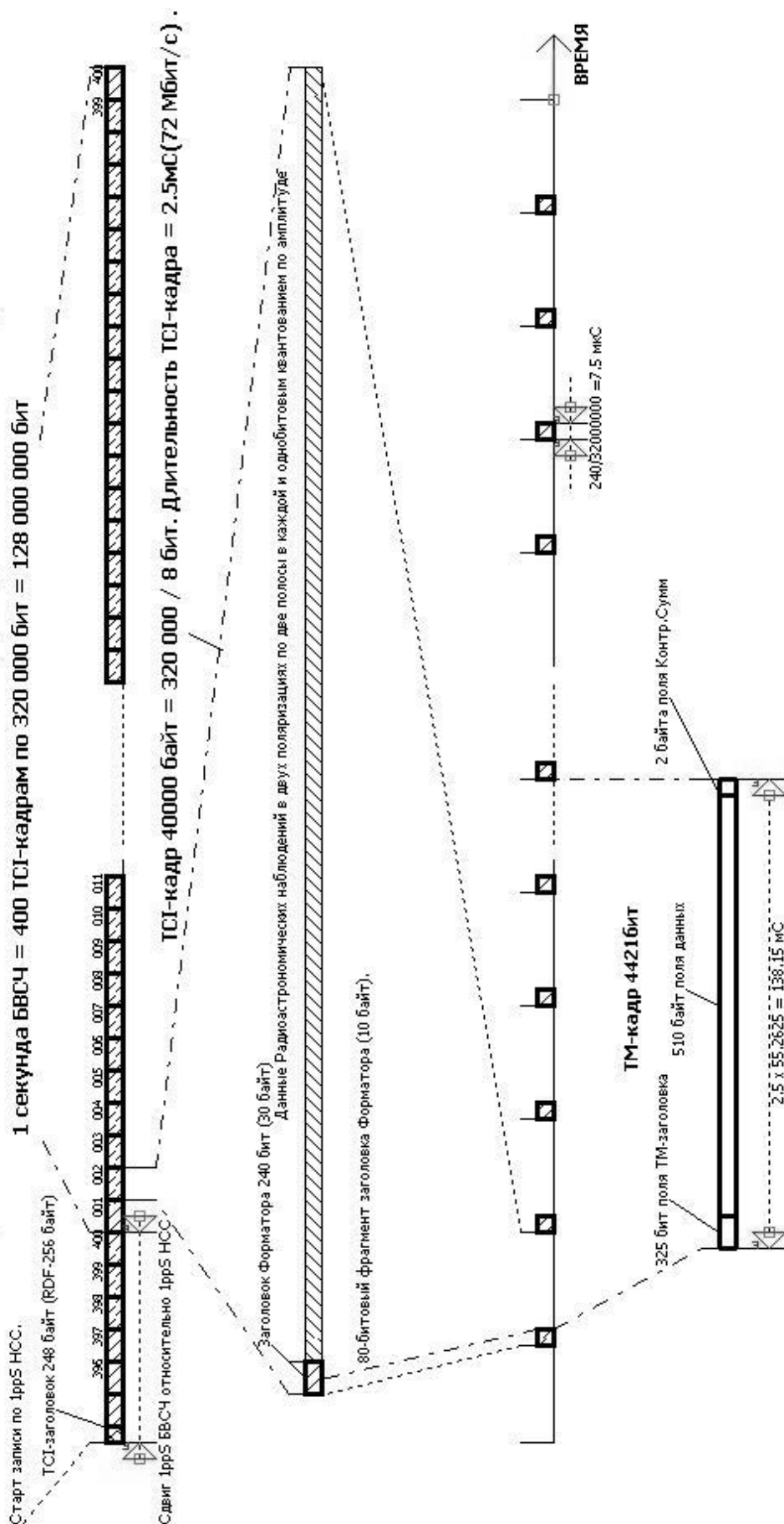
$$\frac{F_{TMC} - F_{БВСЧ}}{F_{БВСЧ}} = 3.7 \cdot 10^{-7}$$

Режим синхронной работы телеметрической системы от опорного сигнала БВСЧ конструкцией КРТ не предусмотрен. Отмеченная асинхронность, с учетом высокой скорости выходного потока, делает практически невозможным качественное (с точностью до периода тактовой частоты) сопоставление показаний счетчика кадров Форматора с метками времени телеметрической системы.

Однако, упомянутая задача сопоставления весьма интересна, поскольку ее решение позволяет связать воедино все функционирование КРТ в целом.

Для решения, в том числе и этой задачи сопоставления, используется технология синтеза БКШВ.

# СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА 1-ГО КАНАЛА ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ С БОРТА КРТ "РАДИОАСТРОН" ЧЕРЕЗ ВИРК



ТМ-кадр 4421бит передаются в 55 целых фрагментах по 80бит и секции в 21бит (4421 / 80 = 55.2625).

За одну секунду БВСЧ передается 7.2381 ТМ-кадров при 72Мбит/с или 1.8 ТМ-кадра при 18 Мбит/с.

Программа формирования кадров N4 содержит 16 кадров. Длительность одного периода программы составляет:

- 1)  $16 \times 4421 = 70736$  бит в программе N4 ;
- 2)  $70736 / 80 = 884,2$  кадра Форматора в программе N4;
- 3)  $884,2 \times 2,5 \text{ мс} = 2210,5 \text{ мс}$ . Длительность программы N4.

Рис.9

### 4.3. Способ синтеза Бортовой Квантовой Шкалы Времени.

Упомянувшийся выше информационный кворум сигналов трех независимых шкал времени позволяет сконструировать шкалу времени, работающую от сигналов бортового квантового генератора. Бортовая квантовая шкала времени является решением задачи сопоставления показаний счетчика кадров Форматора с метками времени БШВ, и с метками времени шкалы станции слежения – ШВ НСС. Практическое использование БКШВ определило ее основное назначение в настоящих исследованиях, как способа измерения дальности КРТ относительно станции слежения ПРАО, а также в качестве инструмента для исследования релятивистских эффектов во время полета КРТ.

Для решения задачи синтеза БКШВ был реконструирован аппаратно – программный комплекс “КОРВЕТ\_Р”, который помимо прочего, выполняет функцию синтезатора последовательности (далее секвенсора) секундных меток всех трех упомянутых шкал времени.

К настоящему времени алгоритм работы комплекса в целом состоит из четырех основных этапов:

- просмотр всех двоичных записей радиоастрономических наблюдений в виде RDF или TCI-файлов для одного витка КРТ и формирование комплекса реляционно - связанных измерительных таблиц. В процессе просмотра записей подготавливаются мета-файлы.
- деконволвер, используя комплекс реляционно - связанных измерительных таблиц, извлекает из мета - файлов комбинированную последовательность секундных меток в виде числового массива.
- Полученная последовательность секундных меток поступает на вход трехканального секвенсора – синтезатора сигналов секундных меток всех трех используемых шкал времени.
- Все три выхода секвенсора подключаются к входам многоканального цифрового запоминающего осциллографа, играющего роль трехканального синхронизатора. Подобная схема подробно рассмотрена в [3]. В качестве иллюстрации на рисунке 10 представлена типовая осциллограмма с результатами работы синтезатора БКШВ.

Важным этапом работы деконволвера и секвенсора БКШВ является этап начальной установки БКШВ. Этот этап состоит из двух ступеней, - синхронизации и юстировки.

Под синхронизацией понимается процесс предварительного определения положения первого маркера БКШВ на интервале измерений [8,9]. Процедура синхронизации повторяется, если результат измерений превышает установленный предел точности. Предусмотрены два предела синхронизации: 1 микросекунда и 100 наносекунд.

Под юстировкой понимается процедура точного определения последовательности номеров кадров форматора, в которых находятся маркеры БКШВ. Результатом измерений на этапе юстировки служат номера двух пар соседних бит RDF-записи, между которыми расположен первый и последний маркеры БКШВ для текущей записи. Для оценки погрешности измерений используется несколько проверочных процедур:

- процедура сравнения с результатами орбитальных измерений системы KORTEK;
- процедура сравнения с результатами измерений НСС ПРАО;
- процедура сопоставления результатов с данными орбитального прогноза;
- процедура сопоставления результатов с данными специальных тестовых сеансов;

На осциллограмме, представленной на рисунке 10, черными стрелками условно обозначен измеряемый интервал времени численно равный текущему значению ККНЗ. В нижней части рисунка, в строке с индексом “value”, указано текущее значение величины измеряемого интервала времени в миллисекундах (показания измерителей P1, P2 и P3 на осциллограмме уменьшены в 3000 раз).

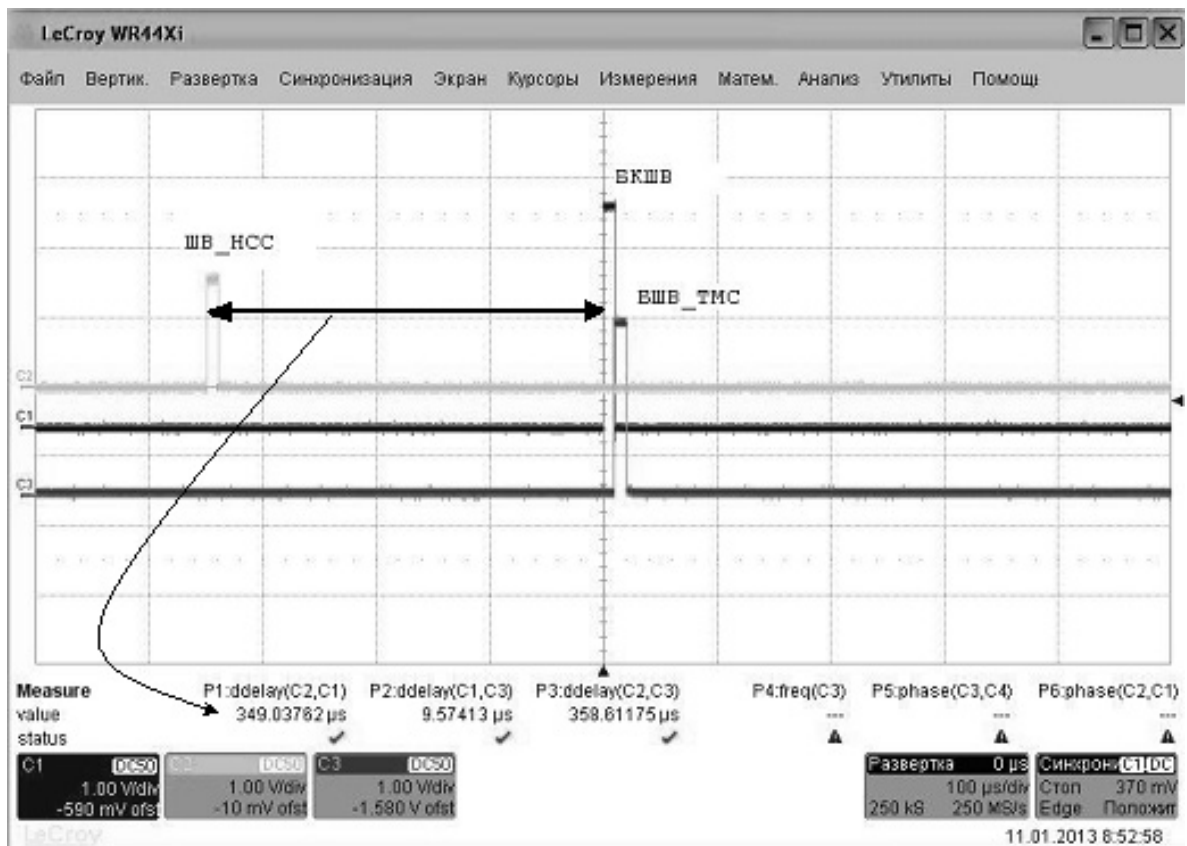


Рис.10

## 5. Результаты исследований.

### 5.1. Наблюдение релятивистского эффекта замедления времени во время полета КРТ.

Обнаруженное эмпирическое соотношение (1) между периодом смены номеров кадров форматора и средним значением радиальной скорости КРТ на известном интервале времени, которое рассматривалось выше, навело на мысль о возможности наблюдения эффекта релятивистского замедления времени на борту КРТ. Под релятивистским замедлением здесь подразумевается кинематический эффект специальной теории относительности, заключающийся в том, что в движущемся теле все физические процессы проходят медленнее, чем следовало бы для неподвижного тела по отсчетам времени неподвижного наблюдателя (неподвижной системы отсчета). Количественное описание замедления времени обычно интерпретируют с использованием преобразования Лоренца [7]:

$$\Delta t_o = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - v^2(\tau) / c^2} d\tau, \quad (3)$$

где  $\Delta t = (t_2 - t_1)$  – время, проходящее между двумя событиями движущегося КРТ с точки зрения неподвижного наблюдателя, т.е. по часам НСС (или по ШВ\_НСС);

$\Delta t_o$  – время, проходящее между двумя событиями движущегося КРТ с точки зрения наблюдателя, связанного с КРТ, т.е. по Бортovým Атомным Часам (или по БКШВ);

$v$  – относительная скорость движения КРТ;

$c$  – скорость света в вакууме.

Используя результаты наблюдений за более, чем полуторалетний интервал наблюдений полета КРТ проекта “РадиоАстрон”, удалось выбрать момент времени для начала синтеза отсчетов БКШВ, - 07 января 2013 года в 13 часов 00 минут 00 секунд UTC. В качестве величины, характеризующей кинематическое замедление времени, был выбран интервал времени между двумя моментами времени в различных шкалах времени.

$$T_d = (t_{\text{SRT}} - t_{\text{TS}}) - (d_{\text{PREDICT}} / C), \quad (4)$$

где

$T_d$  – измеряемый интервал времени, с;

$t_{\text{SRT}}$  – показания времени по БКШВ, с;

$t_{\text{TS}}$  – показания времени по ШВ НСС, с;

$d_{\text{PREDICT}}$  – ожидаемая дистанция между КРТ и НСС, соответствующая  $t_{\text{TS}}$ , в км ;

$C$  – скорость света в вакууме, км/с.

Отношение ( $d_{\text{PREDICT}} / C$ ) соответствует длительности ожидаемой задержки распространения на дистанции между КРТ и НСС ПРАО. Физический смысл, рассматриваемого в формуле (3) отношения, состоит в операции пространственной коррекции значения величины  $T_d$  в точку с координатами НСС ПРАО. Отметим, что существует решение задачи калибровки БКШВ, при выполнении которой, разность ( $t_{\text{SRT}} - t_{\text{TS}}$ ) может быть использована в качестве результата прямых измерений ККНЗ, обсуждавшейся выше. При решении задачи калибровки БКШВ используется зависимость, представленная на рисунках 3 и 4. Практическое применение рассматриваемого соотношения (4) представлено на осциллограмме рисунка 10. Величина разности ( $t_{\text{SRT}} - t_{\text{TS}}$ ) указана в строке с индексом “value”, а измеряемый интервал помечен черной стрелкой.

В качестве образца для оценки релятивистского замедления времени в настоящих исследованиях используется норма, рекомендованная международным астрономическим союзом [7], которая определяется соотношением:

$$\frac{dT_T}{dT_{CG}} = 1 - L_G, \text{ где} \quad (5)$$

$L_G = 6.969290134 \cdot 10^{-10}$  – определяющая константа;

$TT$  – земное время;  $TT = TAI + 32.184c$ .

$TCG$  – геоцентрическое координатное время.

На рисунке 11 представлена зависимость дальности КРТ от величины наблюдаемого кинематического замедления времени. На рисунке 12 представлены результаты вычислений теоретических значений релятивистского замедления времени на поверхности Земли (5) и результаты измерений кинематического замедления времени на борту КРТ (4).

Результаты измерений ККНЗ логично использовать для оценки отклонения измеренной дальности КРТ от прогнозных значений. В качестве ориентира сопоставления (“Норма”) удобно принять соотношение  $T_{di} = 0$ . Это равенство означает согласие между предсказанными и наблюдаемыми значениями дальности КРТ. Теоретическое отклонение величины ККНЗ от прогнозного значения навигационной задержки обусловлено, в первую очередь, погрешностью синхронизации бортовой и наземной квантовых шкал времени, и трудностью предсказания текущих аппаратурных задержек. На рисунке 13 представлена зависимость отклонений измеренных значений дальности от аналогичных прогнозных значений. Положительное значение отклонения свидетельствует о превышении измеренного значения над прогнозным значением и отображается в зоне “Дальше от НСС”. Отрицательные значения отклонения отображаются в зоне “Ближе к НСС”.



Сравнения прогнозных значений навигационной задержки на дистанции КРТ-НСС\_Пушино с результатами измерений временного сдвига между БКШВ и ШВ НСС, выполненных по результатам радиоастрономических наблюдений 07 января - 13 мая 2013 года (ANZin\_method).

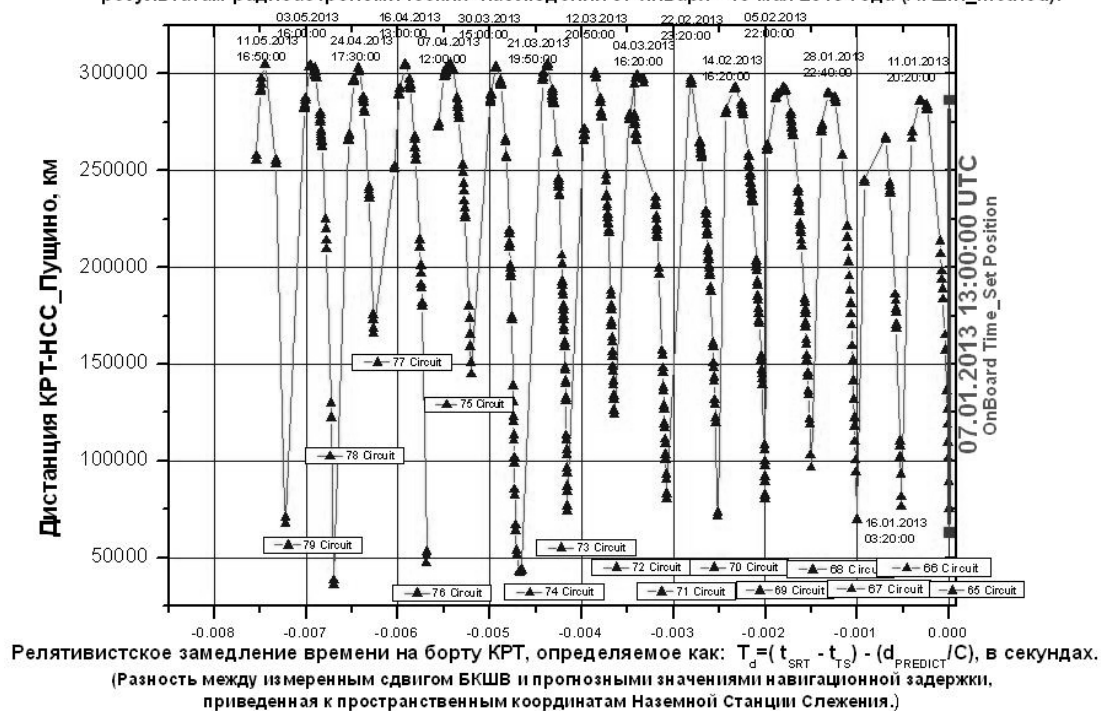


Рис.11

Суточная разность хода Шкал Времени (БКШВ и ШВ НСС\_Пушино), измеренная на интервале радиоастрономических наблюдений с 07.01.2013 по 19.11.2013 (ANZin\_Method\_v.1mkS)  
 $dY/dX = -6.90308E-10$  ; RA\_Observation Rate  $dY/dX = -6.969290134E-10$ ; International Recommended Rate

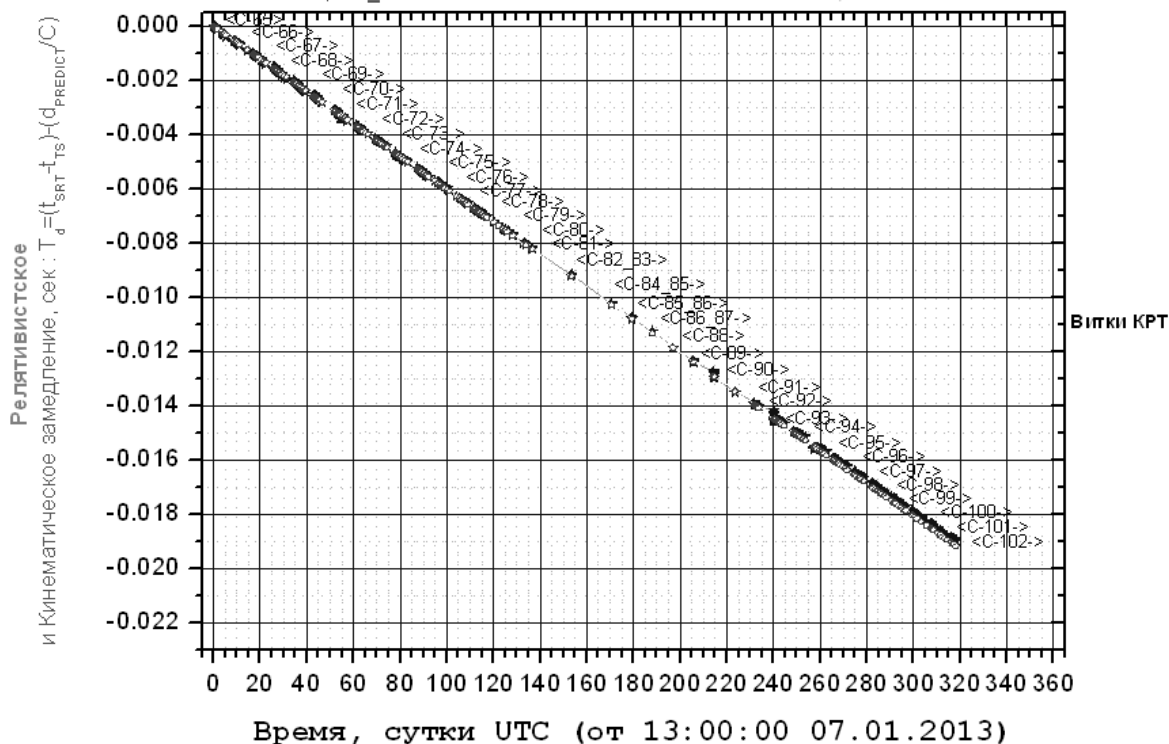


Рис.12

Временная диаграмма отклонений результатов измерений от прогноза дальности КРТ, с использованием когерентной кумулятивной навигационной задержки.  
(сопоставление предсказанной орбиты КРТ с результатами радиоастрономических наблюдений).

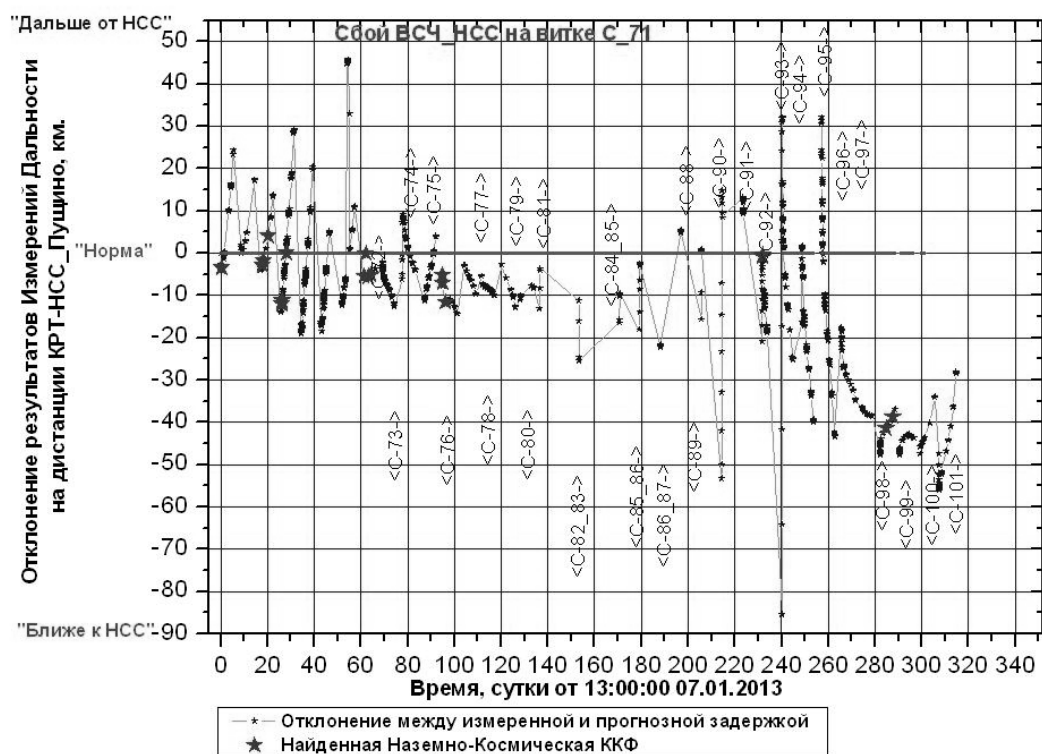


Рис.13

Взаимосвязь между разностью фаз сигналов бортового и наземного Н-мазеров, измеренной на частоте 15ГГц, и значениями радиальной скорости КРТ (эксперимент testPP5 21.02.2013)

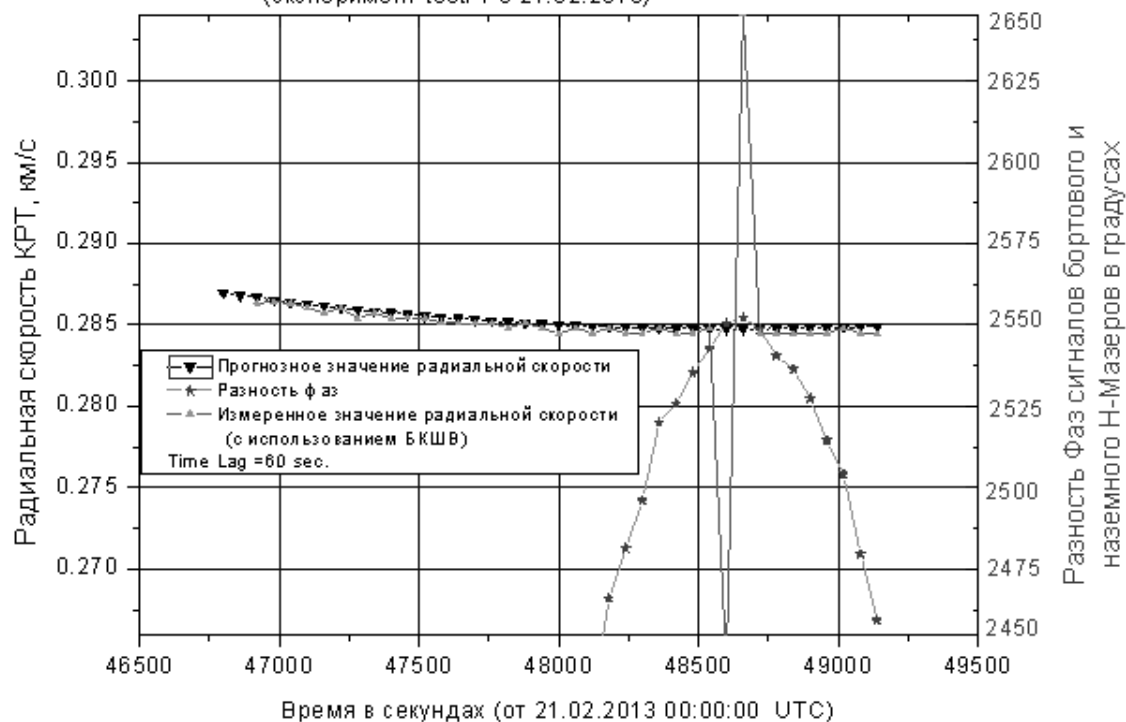


Рис.14

## 5.2. Результаты измерений величины разности фаз сигналов 15ГГц.

Схемой измерений, представленной на рисунке 5, предусмотрен режим измерения разности фаз между синхронными свертками реализаций двух сигналов 15ГГц. Режим работы измерения разности фаз предусматривает формирование НСС двух массивов данных с реализациями исследуемых сигналов. Эти два массива, функционально, соответствуют двум входным каналам типового фазометра. Первый канал (наземный канал фазометра) представляет собой штатные результаты измерений Допплеровского сдвига частоты сигнала 15ГГц. Второй канал (космический канал фазометра) представляет собой синхронную последовательность записей с результатами радиоастрономических наблюдений в виде двоичных RDF-файлов. Функцию измерителя выполняет комплекс синхронных измерительных, вычислительных компьютерных программ и измерительных приборов “КОРВЕТ\_Р”. Технические средства, входящие в состав “КОРВЕТ\_Р”, аналогичны используемым в [10]. Для обеспечения совместимости и достижения необходимой точности “КОРВЕТ\_Р” дополнен специализированными драйверами, вспомогательными синтезаторами, юстировочным источником опорного колебания и многоканальным ЦЗО.

В результате работы “КОРВЕТ\_Р” формируется перечень протоколов с результатами измерений. В качестве примера, на рисунке 14 представлены три синхронные временные зависимости (осциллограммы), которые позволяют сопоставить измеряемую разность фаз опорных сигналов с динамикой движения КРТ проекта “Радиоастрон”.

Анализируя представленный график разности фаз, можно вычислить текущую относительную разность опорных частот бортового и наземного Н-мазеров. Из графика 14 следует, что при практически неизменной радиальной скорости КРТ (относительно НСС) на интервале 1000 секунд, разность фаз сигналов 15ГГц плавно изменилась на 205 градусов. Простой расчет дает относительную разность частот:

$$\frac{205}{15 \cdot 10^9 \cdot 360 \cdot 1000} = 3.79 \cdot 10^{-14}.$$

Полученный результат позволяет оценить величину максимального времени когерентного накопления, которое обеспечивается используемым оборудованием. В качестве критерия максимального изменения разности фаз на интервале накопления принимаем значение, равное 90 градусам. Из зависимости, представленной на рисунке 14, получаем значение, равное 493 секунды. Это результат свидетельствует о штатном качестве работы всех технических средств, формирующих опорные сигналы, как на борту космического радиотелескопа, так на наземной станции слежения Пушино.

### 5.3. Особенность работы аппаратуры КРТ во время выполнения настоящих исследований.

В заключение необходимо отметить несколько особенностей работы аппаратуры КРТ проекта “Радиоастрон”. Способы формирования бортовых квантовых шкал времени для режимов синхронизации от различных источников опорного сигнала отражены на схеме рисунка 6. Работа БКНА допускает использование трех режимов синхронизации БКНА в целом и прибора Форматор в частности:

- режим синхронизации от БВСЧ сигналом 15МГц или 5МГц (переключатель “Н-Мазер” - “Когерент” в положении “Н-Мазер”);
- режим синхронизации от БРСЧ сигналом 5МГц;
- режим синхронизации от ВИРК сигналом 15МГц (переключатель “Н-Мазер” - “Когерент” в положении “Когерент”).

Все представленные выше результаты настоящей работы получены при работе БКНА в режиме синхронизации от БВСЧ сигналом 15МГц, когда переключатель “КОГЕРЕНТ”-“Н-Мазер” схемы рисунка 6 находился в положении “Н-Мазер”. Завершение генерации непрерывной последовательности отсчетов БКШВ происходит в случае смены положения этого переключателя или при выключении питания прибора Форматор. Повторное включение прибора Форматор приводит к формированию новой последовательности кадров и, соответственно, новой БКШВ. Повторное использование БКШВ для измерений возможно после повторного выполнения операций калибровки и юстировки, которые рассматривались выше. Корректно выполненная юстировка (с использованием зависимостей рис.3, рис.4 и рис.12) позволяет учитывать перерыв в работе Форматора и синтезировать непрерывную последовательность секундных меток БКШВ в режиме синхронизации БКНА от сигнала 15МГц БВСЧ.

Фрагментарные исследования работы БКНА в режиме “Когерент”, выполнявшиеся в мае 2012 года, подтвердили замеченную особенность в работе прибора Форматор. К настоящему времени не удалось синтезировать непрерывную БКШВ для режима синхронизации БКНА для режима “Когерент” из-за ограничений по видимости КРТ с позиции НСС ПРАО и из-за температурных ограничений ОНА ВИРК. Предельно допустимая длительность непрерывной работы ВИРК составляет 4 часа.

Исследования работы БКНА в режиме синхронизации от сигнала 5МГц БРСЧ не выполнялись из-за отсутствия результатов радиоастрономических наблюдений, соответствующих этому режиму работы. Особенность этого режима состоит в отсутствии синхронизации между опорным сигналом 5МГц БРСЧ и выходным сигналом 15ГГц ВИРК. Отсутствие этой синхронизации не позволяет выполнить прямые фазовые измерения между сигналами бортового и наземного источников опорных сигналов с использованием технологии, рассмотренной выше. Возможность синтеза непрерывной БКШВ в режиме синхронизации БКНА от сигнала 5МГц БРСЧ сохраняется.

## 6. Выводы по результатам исследований.

1. Измеренная величина потерь достоверности информации радиоастрономических наблюдений, передаваемой с борта КРТ и принимаемой НСС Пущино, составила около 1.5 % (от общего объема информации, принятой с 07.01.2013 по 27.06.2013, равной  $13.2 \cdot 10^{12}$  байт).

2. Во время проведения исследований был подтвержден эффект релятивистского замедления хода времени на борту КРТ (предполагаемый в рамках СТО). Максимальное значение измеренной величины составило:  $-6.95906 \cdot 10^{-10}$ , что соответствует замедлению БКШВ относительно геоцентрического координатного времени на величину в 0.021946091616 секунды в год или на величину в 60.126 микросекунды в сутки.

Полученное значение асимптотически приближается к величине определяющей константы:  $-6.969\,290\,134 \cdot 10^{-10}$ .

Текущее различие между наблюдаемой и вычисленной величинами составило:  $6.95906 \cdot 10^{-10} - 6.969\,290\,134 \cdot 10^{-10} = -0.010230134 \cdot 10^{-10} = -1.02 \cdot 10^{-12}$ .

3. Разность между ходом модели бортовых атомных часов и ходом наземных атомных часов составила: +50 микросекунд за 341 сутки (с 31.01.2012 года по 07.01.2013г.). Это соответствует изменению частоты опорного сигнала БВСЧ относительно частоты опорного сигнала ВСЧ НСС ПРАО, равному:  $-1.697 \cdot 10^{-12}$ . Относительное изменение частоты опорного сигнала БВСЧ, наблюдавшееся в период с 07.01.2013г. по 10.11.2013г., составило:  $-6.126 \cdot 10^{-12}$ .

4. Отклонение результатов измерений дальности КРТ, с использованием ККНЗ, от прогнозных значений не превысило 30 км (по абсолютной величине) на всем интервале 180-суточных наблюдений.

5. Обнаружение зависимости между сменой номеров кадров Форматора и значением дальности КРТ от НСС, которая представлена на рисунках 3 и 4, позволяет создать альтернативные методы измерений дальности, радиальной скорости и ускорения КРТ проекта “Радиоастрон”.

*Проект РадиоАстрон осуществляется Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук и Научно-производственным объединением им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.*

*Автор благодарит А.В. Коваленко, А.В. Бирюкова, М.В. Попова, Ю.А. Ковалева за помощь и всестороннюю поддержку при подготовке настоящего материала.*

## 7. ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Зиновьев А.Н. Результаты исследований двух водородных стандартов частоты типа VCH-1010 проекта “РАДИОАСТРОН” в лабораторных условиях. // Препринт N11, ФИАН, 2009.
4. Авторское Свидетельство на Изобретение. № 1213953. СССР. Устройство для анализа состояния дискретного канала связи. Зиновьев А.Н., Хромой Б.П., Шестаков В.В. // Открытия. Изобретения. – 1986 – №10.
5. Зиновьев А.Н. Сравнительный анализ параметров систем обработки наблюдений VLBI. // Препринт № 36, АКЦ ФИАН, 1994.
6. Бортовой водородный стандарт частоты космического радиотелескопа VCH-1010 . Руководство по эксплуатации. ЯКУР. 411141.015 РЭ ЗАО “Время-Ч”. Нижний Новгород, 2006.
7. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. // Москва: Техносфера, 2002.
8. А.Н. Зиновьев. Аппаратурная синхронизация шкал времени в сегментах интерферометра с нулевой базой. // Препринт № 34, АКЦ ФИАН, 2005.
9. Калашников И.И., Меркадер Л.П., Тимощенко М.Г., Юдин А.И. //Системы связи и радиорелейные линии. Москва: ”Связь”.1977.
10. Авторское Свидетельство на Изобретение. № 1224997. СССР. Устройство для задержки импульсов. Бонч-Бруевич А.М., Зиновьев А.Н. и др. // Открытия. Изобретения. – 1986 – №14.

*Астрокосмический центр ФИАН  
anzint@asc.rssi.ru*

1 декабря 2013 года

Зиновьев А.Н.

Подписано в печать 09.11.2013 г.  
Формат 60x84/16. Заказ №71. Тираж 140 экз. П.л 2.  
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640