

УДК 621.345.3+520.274+681.2.083+621.396.91

ИССЛЕДОВАНИЕ БОРТОВОЙ КВАНТОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ В УСЛОВИЯХ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА ПРОЕКТА “РАДИОАСТРОН”

© 2015 г. А. Н. Зиновьев

*Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
anzin@asc.rssi.ru*

Поступила в редакцию 16.12.2013 г.

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

DOI: 10.7868/S0023420615030103

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 200000 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 кос-

мосе. 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 радиоисточников, 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 радиоастрономических источников. В КРТ проекта “РадиоАстрон” прецизионное приемное

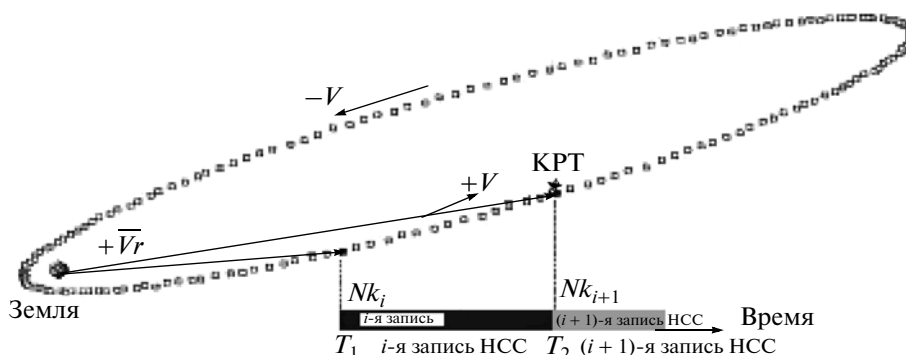


Рис. 1. Функциональная связь между радиальной скоростью КРТ и изменением показаний счетчика кадров бортового прибора Форматор.

оборудование расположено на борту спутника, а регистрацию и запись сигналов радиоастрономических источников выполняет наземная станция слежения в г. Пущино (НСС ПРАО).

Координация работ КРТ осуществляется через служебную телеметрическую систему (ТМС), которая в своем составе имеет техническое средство формирования 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.

ЗАДАЧИ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Начало работы КРТ “РадиоАстрон” на этапе летных испытаний в сентябре 2011 года показало неудовлетворительное качество работы НСС 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 реально-го полета КРТ недостатки упомянутого оборудо-

вания 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 представлена ниже. Суть формулы поясняет рис. 1.

$$\mp(Nk_{i+1} - Nk_i) \approx \frac{(T_2 - T_1)(\pm V_r)}{k_{SC} \tau_{fr} c}, \quad (1)$$

где T_1 , T_2 – моменты времени начала приема станцией слежения (Nk_i) -го и (Nk_{i+1}) -го кадров научных данных соответственно, c ; $\pm V_r$ – среднее значение радиальной скорости КРТ между моментами времени T_1 и T_2 , км/с; τ_{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:

$$k_{SC} = 1 - (F_{BVC} - F_{BVC})/F_{BVC}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ВСЧ}}$ — действительное значение частоты опорного сигнала на выходе водородного стандарта частоты наземной станции слежения. $F_{\text{ВВСЧ}}$ — действительное значение частоты опорного сигнала на выходе бортового водородного стандарта частоты КРТ “РадиоАстрон”.

Формулу (1) можно интерпретировать на примере. Например, при удалении КРТ от Земли с радиальной скоростью 1250 м в секунду периодическая последовательность показаний счетчика нумерации кадров Форматора, которая регистрируется НСС, сдвигается на 1 в сторону уменьшения через каждый интервал времени в 600 с по шкале времени НСС ПРАО. В случае приближения к Земле, после прохождения апогея, изменения происходят в обратной последовательности. Найденное соотношение позволяет контролировать качество работы регистрационно-декодирующего оборудования, измерять радиальную скорость КРТ, используя записи РСДБ наблюдений (при этом результат измерений синхронен и обладает свойством когерентности с наблюдаемыми радиоастрономическими сигналами), выполнять фазовые измерения между сигналами бортового и наземного стандартов частоты, синтезировать бортовую квантовую шкалу 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) фиксацию всех показаний счетчика номеров кадров бортового прибора Форматор;
- в) вычисление текущего значения радиальной скорости КРТ;
- г) вычисление текущего значения доплеровского сдвига частоты принимаемого сигнала когерентного с результатами РСДБ наблюдений.

Для обеспечения оперативности и удобства оценки динамики наблюдений по итогам операции экспресс сканирования формируется итоговая диагностическая таблица (ИДТ). Расчетные формулы и пример расчета ИДТ детально рассмотрены в [10].

В результате проделанной работы по усовершенствованию регистрационно-декодирующего оборудования НСС ПРАО к 9.XI.2012 г. удалось существенно (примерно в 10 раз) уменьшить число аппаратных сбояв. 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. Рис. 2 иллюстрирует

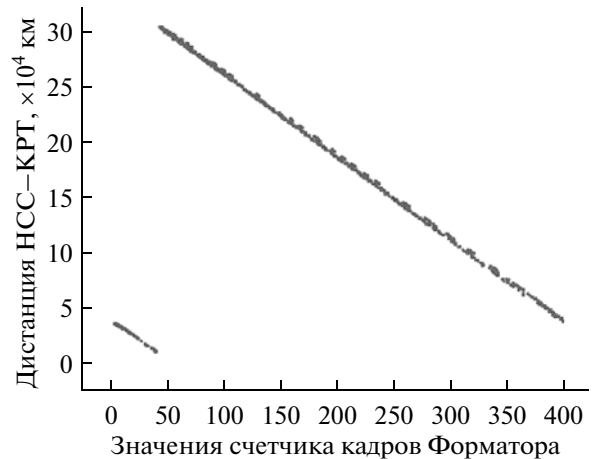


Рис. 2. Взаимосвязь между величиной дистанции НСС-КРТ и показаниями счетчика кадров бортового прибора Форматор.

линейность показаний счетчика номеров кадров на дистанции НСС-КРТ для 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 РСДБ наблюдений.

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 БКШВ на Земле с использованием выходного сигнала БВСЧ 15 МГц. 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 с (апогей КРТ).

СПОСОБ СИНТЕЗА БОРТОВОЙ КВАНТОВОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

Упомянутый 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 TSI-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]. Иллюстрации типовых осциллограммы и результаты работы синтезатора БКШВ представлены в [10]. Важным этапом работы декомволвера 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

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.

Используя результаты наблюдений за более, чем полуторалетный интервал наблюдений полета КРТ проекта “РадиоАстрон”, удалось выбрать момент времени для начала синтеза отсчетов БКШВ — 7.1.2013 г. в 13.00.00 UTC. В качестве величины, характеризующей кинематическое замедление времени, был выбран интервал времени между двумя моментами времени в различных шкалах времени.

$$T_d = (t_{\text{SRT}} - t_{\text{TS}}) - (d_{\text{PR}}/c), \quad (3)$$

где T_d — измеряемый интервал времени, с; t_{SRT} — показания времени по БКШВ, с; t_{TS} — показания

времени по ШВ НСС, с; d_{PR} — ожидаемая дистанция между КРТ и НСС, соответствующая t_{TS} , в км.

Отношение (d_{PR}/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 рис. 2. В качестве образца для оценки релятивистского замедления времени в настоящих исследованиях используется норма, рекомендованная международным астрономическим союзом [6, 7], которая определяется соотношением:

$$dT/dTCG = 1 - L_G, \quad (4)$$

где $L_G = 6.969290134 \cdot 10^{-10}$ — определяющая константа; TT — земное время; $TT = TAI + 32.184$ с; TCG — геоцентрическое координатное время.

На рис. 3 представлены результаты вычислений (4) теоретических значений релятивистского замедления времени на поверхности Земли и результаты измерений кинематического замедления времени на борту КРТ с использованием соотношения (3). Результаты измерений ККНЗ логично использовать для оценки отклонения измеренной дальности КРТ от прогнозных значений. В качестве ориентира сопоставления (“Норма”) удобно принять соотношение $T_d = 0$. 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. Более подробно результаты наблюдений и измерений рассмотрены в [10].

ВЫВОДЫ

1. Измеренная величина потерь достоверности информации радиоастрономических наблюдений, переданной с борта КРТ и принятой НСС Пушино, составила около 1.5% (от общего объема информации, принятой с 7.1.2013 по 27.VI.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). Минимальное значение из-

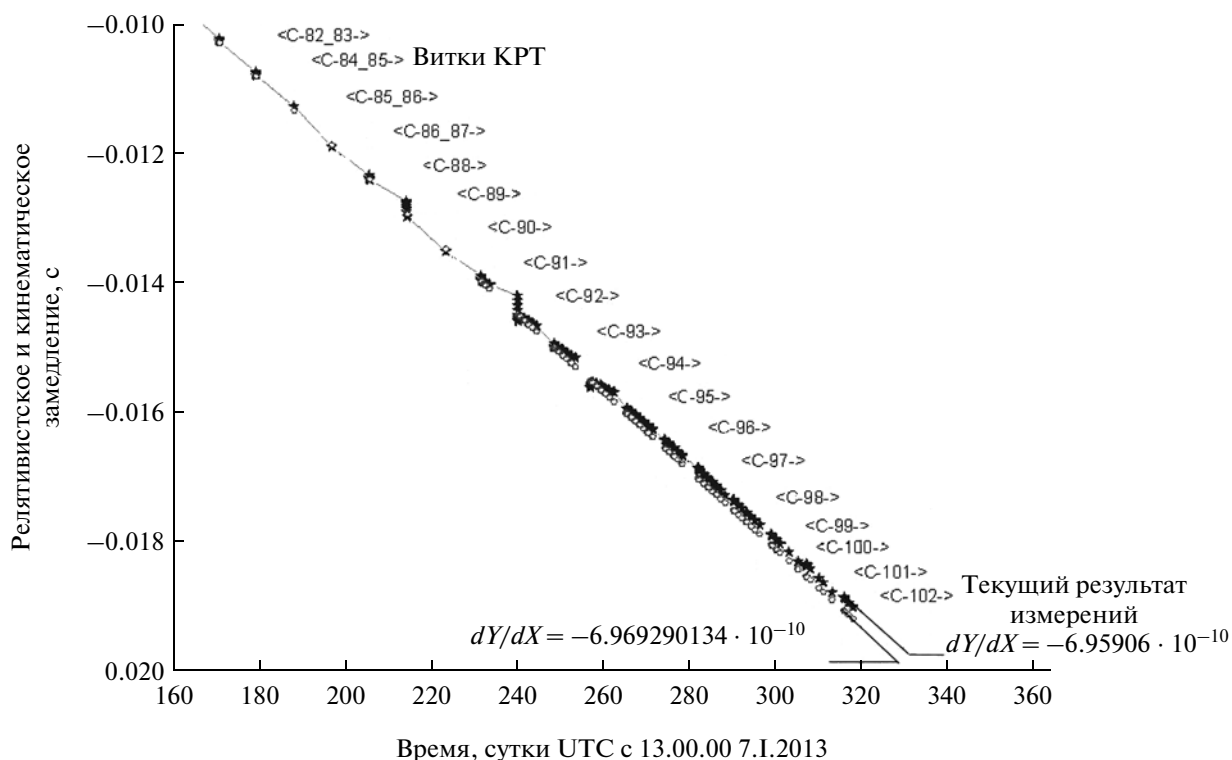


Рис. 3. Разность хода шкал времени (БКШВ и ШВ НСС ПРАО) T_d , измеренная на интервале радиоастрономических наблюдений в период с 7.I.2013 г. по 19.XI.2013 г.

меренной величины составило: $-6.95906 \cdot 10^{-10}$, что соответствует замедлению БКШВ относительно геоцентрического координатного времени на величину в 0.021946091616 с в год или на величину в 60.126 микросекунды в сут. Полученная зависимость близка к величине определяющей константы: $-6.969290134 \cdot 10^{-10}$. Текущее отклонение составило:

$$\begin{aligned} & 6.95906 \cdot 10^{-10} - 6.969290134 \cdot 10^{-10} = \\ & = -0.010230134 \cdot 10^{-10} = -1.02 \cdot 10^{-12}. \end{aligned}$$

3. Разность между ходом модели бортовых атомных часов и ходом наземных атомных часов составила: $+50$ микросекунд за 341 сут (с 31.I.2012 г. по 7.I.2013 г.). 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 7.I.2013 г. по 10.XI.2013 г., составило: -6.126×10^{-12} .

Сопоставляя полученные результаты, можно отметить, что эффект релятивистского и кинематического замедления времени на борту КРТ примерно в 6 раз меньше, чем относительное изменение опорных частот ВСЧ НСС ПРАО и БВСЧ КРТ.

4. Отклонение результатов измерений дальности КРТ, с использованием ККНЗ, от прогнозных

значений не превысило 30 км (по абсолютной величине) на интервале 180-суточных наблюдений в период с 7.I.2013 г. по 10.VII.2013 г.

5. Обнаружение зависимости между сменой номеров кадров Форматора и значением дальности КРТ от НСС, которая представлена на рис. 2, позволяет создать альтернативные методы измерений дальности, радиальной скорости и ускорения КРТ проекта "РадиоАстрон".

Проект "РадиоАстрон" осуществляется Астро-космическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и НПО им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно со многими научно-техническими организациями в России и других странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Ю.А., Андреев В.В., Бабакин Н.Г. "РадиоАстрон" (проект "Спектр-Р") – радиотелескоп много больше Земли. Основные параметры и испытания // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 3. С. 11.
2. Александров Ю.А., Андреев В.В., Бабакин Н.Г. "РадиоАстрон" – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты // Астрон. журн. 2013. Т. 90. № 3. С. 179.

3. *Зиновьев А.Н.* Результаты исследований двух водородных стандартов частоты типа VCH-1010 проекта “РадиоАстрон” в лабораторных условиях. Препринт ФИАН. 2009. № 11.
4. *Зиновьев А.Н., Хромой Б.П., Шестаков В.В.* Устройство для анализа состояния дискретного канала связи // СССР. Открытия. Изобретения. 1986. № 10. Авторское свидетельство на изобретение № 1213953.
5. *Зиновьев А.Н.* Сравнительный анализ параметров систем обработки наблюдений VLBI. Препринт ФИАН. 1994. № 36.
6. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. М.: Техносфера, 2002.
7. *Зиновьев А.Н.* Аппаратурная синхронизация шкал времени в сегментах интерферометра с нулевой базой. Препринт ФИАН. 2005. № 34.
8. *Калашников И.И., Меркадер Л.П., Тимищенко М.Г., Юдин А.И.* Системы связи и радиорелейные линии. М.: Связь, 1977.
9. *Бонч-Бруевич А.М., Зиновьев А.Н. и др.* Устройство для задержки импульсов // СССР. Открытия. Изобретения. 1986. № 14. Авторское свидетельство на изобретение № 1224997.
10. *Зиновьев А.Н.* Результаты исследований наземной и бортовой квантовых шкал времени в условиях орбитального полета космического радиотелескопа проекта “РадиоАстрон”. Препринт ФИАН. 2013. № 14.