УДК 621.345.3 +520.274+681.2.083+621.396.91

Технология синхронных измерений дальности с использованием эффекта реверберации в условиях орбитального полета космического радиотелескопа проекта РадиоАстрон

Зиновьев А.Н.

г. Москва, Россия, сентябрь 2018г.

Представлен результат обнаружения нового эффекта, который заключается в появлении характерных откликов из-за ретрансляции сигнала в направлении от космического радиотелескопа к наемной станции слежения в режиме "КОГЕРЕНТ". Предложена технология, позволяющая выполнять измерения дальности от космического аппарата "Спектр-Р" до наземной станции слежения во время сеансов радиоастрономических наблюдений наземно-космическим интерферометром проекта РадиоАстрон. Отмечены практические особенности и преимущества предложенной технологии. Перечислены пути повышения разрешающей способности и снижения погрешности измерений дальности с использованием обнаруженного эффекта.

! Ключевые слова: космический радиотелескоп (КРТ), кросс частотная корреляционная функция остаточного сдвига Доплера (КЧКФ ОДС), бортовой водородный стандарт частоты (БВСЧ), петля фазовой синхронизации высокоинформативного радиоканала (ПФС ВИРК), наземная станция слежения (НСС), реверберация.

Введение. Предыстория к обнаружению эффекта космической реверберации

В период с 2014 по 2017 годы, в рамках проекта РадиоАстрон, выполнялся ряд экспериментов для исследования бортовой квантовой шкалы времени космического радиотелескопа (КРТ) [1,2]. Синхронизация бортовой и наземной шкал времени обеспечивалась обработкой результатов упомянутых экспериментов, которая включала в себя вычисление кросс частотной корреляционной функции остаточного доплеровского сдвига (КЧКФ ОДС). В августе 2017 года режим работы бортового комплекса научной аппаратуры (БКНА) изменился в связи с исчерпанием запаса молекулярного водорода в бортовом водородном стандарте частоты (БВСЧ). БКНА перешел в режим работы "КОГЕРЕНТ". Процедура вычисления КЧКФ ОДС была сохранена с целью диагностики исправности БКНА КРТ и оборудования наземных станций слежения (НСС). Режим "КОГЕРЕНТ" предусматривает использование сигнала наземного стандарта частоты для формирования необходимых наборов гетеродинных и тактовых частот на борту КРТ [3,4]. Для реализации этого режима необходимо включение аппаратуры петли фазовой синхронизации высокоинформативного радиоканала (ПФС ВИРК). Функциональная схема работы БКНА в режиме "КОГЕРЕНТ" представлена на рисунке 1. Аппаратура ПФС ВИРК состоит из двух сегментов - космического , находящегося на борту КРТ, и наземного, находящегося на каждой из двух НСС. В зависимости от условий видимости и теплового режима КРТ, для сеанса наблюдений заранее выбирается одна из двух НСС (Пущино, Россия или Грин Бэнк, США). Выбранная НСС обеспечивает сеанс РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой) наблюдений опорным сигналом и передает на борт КРТ по восходящей радиолинии исходный сигнал опорной частоты

7.2075 ГГц. Принимая этот сигнал, аппаратура ПФС ВИРК КРТ формирует сигнал опорной частоты 15 МГц, который далее используется по трем направлениям:

1. Формируется необходимый набор гетеродинных и тактовых частот.
2. Формируется тоновый измерительный сигнал 8,4 ГГц для нисходящей радиолинии.
3. Формируется коммуникационный сигнал 15 ГГц для нисходящей радиолинии от КРТ к активной НСС.

В настоящей работе под остаточным доплеровским сдвигом понимается величина, которая определяется следующим соотношением:

$$\Delta f(t_i) = (f_{obs}(t_i) - f_{calc}(t_i)), \qquad (1)$$

где

Δf – значение частоты остаточного доплеровского сдвига, обусловленное отсутствием точных априорных знаний о величине радиальной скорости КРТ;

f_{obs} – измеренное значение частоты сигнала, переданного с борта КРТ и принятого в одном из двух диапазонов (15 ГГц или 8.4 ГГц) на одной из двух НСС (Пущино или Грин Бэнк);

f_{calc} – предсказанное, по прогнозу, значение частоты сигнала, ожидаемого на НСС в соответствующем диапазоне (15 ГГц или 8.4 ГГц) для момента времени по шкале времени НСС;

t_i – момент времени измерений по шкале времени измеряющей НСС.

Задача и методы исследований. Режим “КОГЕРЕНТ” и режим "Н-Мазер"

Главный недостаток КРТ проекта РадиоАстрон состоит в отсутствии технологии измерения дистанции между НСС и КРТ во время сеансов радиоастрономических наблюдений. Дальность определяется косвенно по результатам измерений оборудования, находящегося за пределами использующихся НСС (Пущино, Россия и Грин Бэнк, США) [5,6,7]. Таким образом, все наблюдения КТР сопровождает ошибка синхронизации между данными КРТ и результатами измерений дальности, что существенно повышает погрешность наземно-космического интерферометра в целом [8]. Величину погрешности синхронизации наглядно иллюстрируют временные диаграммы результатов измерений частоты и фазы остаточного доплеровского сдвига, которые представлены на рисунке 2. На представленном рисунке величина погрешности превышает 6 минут времени, что в пересчете на дальность составляет около 100 км. Для иллюстрации масштаба решаемой задачи на рисунке 2 дополнительно изображен график прогноза радиальной скорости КРТ, который использовался для работы НСС Грин Бэнк. Задача настоящего исследования состоит в поиске технологии устраняющей отмеченный недостаток. Для решения поставленной задачи используются оба метода синхронизации БКНА, а также результаты стерео экспериментов [2,9,10,11].

При работе в режиме "КОГЕРЕНТ" наземная аппаратура НСС использует прогноз орбиты КРТ, который позволяет так синтезировать исходный сигнал восходящей радиолинии, что влияние доплеровских сдвигов, вызванных движением КРТ и вращением Земли, компенсируется на борту КРТ естественным образом [5,6]. Контроль над соответствием баллистического прогноза фактическому движению КРТ выполняется измерительным оборудованием НСС путем измерения доплеровских сдвигов на двух частотах 8.4 ГГц и 15 ГГц [12,13]. Данные измерений записываются одновременно и синхронно с регистрацией научных данных РСДБ наблюдений [14]. В результате обработки доплеровских измерений режима "КОГЕРЕНТ" и вычисления КЧКФ ОДС был обнаружен эффект, который не наблюдался при работе БКНА от БВСЧ (режим “Н-Мазер”). На рисунке 3а представлена КЧКФ ОДС для режима “Н-Мазер” по результатам сеанса Raks18cz, проводившегося 27.10.2017 года. Рисунки 3b и 4 иллюстрируют аналогичную функцию для сеанса Raks18cz, выполненного в режиме "КОГЕРЕНТ". Сопоставление представленных результатов иллюстрирует наличие двух характерных минимумов, которые симметрично отстоят от главного максимума КЧКФ ОДС режима "КОГЕРЕНТ". Дальнейшие наблюдения за величиной интервала времени, который на рисунке 3b помечен стрелкой с символами 2t, показало, что длительность этого интервала времени изменяется по мере движения КРТ по орбите. Таким образом, встала задача интерпретации наблюдаемого эффекта с учетом известных физических явлений.

В режиме "КОГЕРЕНТ" сигнал 7.2075 ГГц, излучаемый одной активной НСС, ретранслируется бортовой аппаратурой ПФС ВИРК обратно на Землю к источнику в виде двух когерентных сигналов 15 ГГц и 8.4 ГГц. Кроме того, существует вероятность непосредственного переотражения частотных компонент сигнала 7.2075 ГГц от борта КРТ. Таким образом, логично предположить, что сигналы на нисходящей радиолинии (от КРТ к НСС) являются фактическим отражением единственного сигнала восходящей радиолинии 7.2075 ГГц (от НСС к КРТ). Обычное отражение радиосигналов от объектов (например, в радиолокации) фиксируется по положительному отклику корреляционной функции и характеризуется временем распространения зондирующего радиосигнала. С другой стороны, “антикорреляционные” всплески на корреляционных функциях характерны для эхосигналов, используемых рефлектометрами.

Результаты исследований.

1. Интерпретация обнаруженного эффекта

В качестве известной аналогии наблюдаемого эффекта удобно рассматривать акустический эффект реверберации, который характеризуется временем реверберации. Напомним, что термин реверберация произошел от латинского слова reverberare – отражать. Время реверберации оценивается интервалом времени между моментом окончания излучения сигнала и моментом времени, когда регистрируемый уровень передававшегося сигнала снизится на 60дБ (в миллион раз). Эффект реверберации, в виде постепенного уменьшения интенсивности сигнала при его многократных отражениях от окружающих объектов, наблюдается в гидроакустике, гидролокации, радиолокации и связи. В акустических системах время реверберации может достигать нескольких секунд. Похожее обстоятельство присутствует и в проекте РадиоАстрон. Поскольку орбита КРТ простирается на более чем 300000 км, то задержка распространения может превышать 1 секунду. Это обстоятельство, собственно, и навело на мысль о "реверберативной"

природе наблюдаемого эффекта. Явление реверберации состоит в суперпозиции различных эхосигналов от одного источника. В нашем случае эхосигналами являются сигналы КРТ 8.4 ГГц и 15 ГГц, а единственной первопричиной для эха служит сигнал 7.2075 ГГц. Коррелометр (см. рисунок 4), проводя вычисления, иллюстрирует наличие статистической связи (аналога суперпозиций отражений) между эхосигналами. В пользу наличия эффекта реверберации свидетельствует тот факт, что амплитуда главного максимума КЧКФ ОДС определяет и амплитуды реверберационных минимумов этой функции. Положение главного максимума КЧКФ ОДС на оси задержек соответствует интервалу времени между моментом начала измерений на частоте 8.4 ГГц и моментом времени начала измерений на частоте 15 ГГц. Видимая симметрия реверберационных минимумов относительно главного максимума КЧКФ ОДС обусловлена особенностями наблюдаемого эффекта и может быть использована для повышения качества работы измерительных средств. Отметим, что наблюдаемый эффект имеет характерное отличие от радиолокационного отклика в том, что для его обнаружения необходимы дополнительные условия:

- Предварительная подготовка прогноза радиальной скорости КРТ.
- Синхронность прогноза с фактическим движением КРТ. Второе условие практически не выполняется в области перицентров орбиты КРТ. В результате рассматриваемый эффект на этих участках орбиты ослаблен в десятки раз.
- Одновременность и синхронность работы измерителей доплеровских сдвигов на частотах 8.4 ГГц и 15 ГГц. В процессе выполнения радиоастрономических наблюдений с соблюдением третьего условия возникали проблемы, которые легко обнаруживаются по виду КЧКФ ОДС.

2. Пример практического использования обнаруженного эффекта космической реверберации

Для подтверждения воспроизводимости наблюдаемого эффекта были повторно обработаны результаты серии стерео экспериментов [2]. В этих экспериментах обе НСС (Пущино, Россия и Грин Бэнк, США) принимали сигналы КРТ одновременно. В результате выяснилось, что в режиме работы БКНА КРТ от бортового квантового генератора - БВСЧ и отсутствии сигнала восходящей радиолинии, реверберативный эффект не наблюдался ни на кросс частотных, ни на кросс станционных корреляционных функциях. На рисунках 5 и 6 представлены графики, как кросс частотных корреляционных функций, так и кросс станционных корреляционных функций для частот 8.4 ГГц и 15 ГГц соответственно. Для практических измерений и наблюдений обнаруженного эффекта был изготовлен аппартно-программый коррелометр. Слайд панели управления представлен на рисунке 4. На два входа этого коррелометра загружаются массивы с результатами доплеровских измерений одной НСС. Величину наблюдаемого эффекта оказалось удобным сопоставлять с прогнозом орбиты КРТ. Для преобразования КЧКФ ОДС в результат измерения дальности был дополнительно изготовлен программный измеритель дальности. Серия выполненных измерений позволила подтвердить тот факт, что интервал времени между наблюдаемыми реверберативными минимумами КЧКФ ОДС прямо пропорционален удвоенной задержке

распространения сигнала на нисходящей радиолинии в направлении от КРТ к НСС. В проекте РадиоАстрон обе НСС выполняют доплеровские измерения с интервалом в 40 миллисекунд, что соответствует распространению сигнала на расстояние около 12000 км. Указанная разрешающая способность рассматриваемого метода недостаточна для сопоставления с результатами прогноза. Для повышения точности изменений в предложенной технологии используется упомянутый выше программный измеритель. В задачу этого измерителя входит повышение разрешающей способности и снижение погрешности измерений дальности. На вход измерителя поступают данные с выхода коррелометра. Обработка массива данных КЧКФ ОДС выполняется в двух режимах. Первый режим, - полиномиальный, состоит в аппроксимации КЧКФ ОДС полиномом 9-го порядка по методу наименьших квадратов. Второй режим использует библиотеку специальных управляемых шаблонов (вейвлетов). Ниже, на рисунках 7,8,9 и 10 представлены результаты измерений, выполненные в первом – полиномиальном режиме. **Работа в этом режиме повышает разрешающую способность метода измерений примерно в 10 и более раз.**

На рисунке 7 представлены измерения дальности, выполненные по результатам доплеровских измерений НСС Грин Бэнк (США) во время сеансов РСДБ наблюдений на 279 витке КРТ. На рисунке 8 представлены аналогичные измерения дальности, выполненные по результатам доплеровских измерений НСС Пущино (Россия). На рисунке 9 представлена временная диаграмма отклонений результатов измерений дальности от прогнозных значений дальности для 279 витка орбиты КРТ. Рисунок 10 иллюстрирует режим выполнения измерений дальности синхронно с регистрацией данных РСДБ наблюдений. В этом режиме КЧКФ ОДС вычисляется для произвольного момента времени на любом, заранее заданном, интервале времени сеанса наблюдений за счет взаимного смещения массивов на входе коррелометра с использованием элемента переменной задержки [15].

В целях снижения погрешности измерений дальности, особое внимание следует уделять контролю за соблюдением когерентности принимаемых сигналов 15 ГГц и 8.4 ГГц . Для решения этой задачи удобно использовать двух выборочную вариацию Аллана. На рисунках 11 и 12 представлены результаты измерений нестабильности принимаемых сигналов с использованием значений фазы остаточного доплеровского сдвига. Диаграммы вариации Аллана представлены для режимов “Непрерывный Н-Мазер” и “КОГЕРЕНТ”. На представленных диаграммах наблюдается практическая параллельность вариаций для обоих сигналов 15 ГГц и 8.4 ГГц, которая свидетельствует о качественной когерентности этих сигналов на всех интервалах осреднения, использующихся в сеансах РСДБ – наблюдений проекта РадиоАстрон в рамках настоящих исследований.

Заключение. Перспективные пути совершенствования методов измерений на основе обнаруженного эффекта

Суть представленной технологии измерения дальности состоит в вычислении кросс частотной корреляционной функции между массивами результатов измерений остаточных доплеровских сдвигов на 15 ГГц и 8.4 ГГц, которые, в свою очередь, характеризуют отклонение фактического движения КРТ от прогноза. Для КЧКФ ОДС режима "КОГЕРЕНТ" характерно наличие двух реверберационных минимумов.

Экспериментально установлено, что интервал времени между этими минимумами пропорционален удвоенной задержке распространения радиосигналов от КРТ к НСС.

Практическое использование представленной технологии позволяет выделить характерные особенности используемых методов измерений.

1. Рассмотренная технология измерения дальности существенно меньше зависит от погодных условий в атмосфере Земли в сравнении с технологиями лазерных измерений.

2. Получаемые результаты измерений дальности ***синхронны*** с данными РСДБ в космическом плече интерферометра, так как для их выполнения используется один и тот же опорный генератор наземной НСС.

3. Выполнение измерений возможно в двух режимах, - непосредственно во время РСДБ сеанса (“on-line”) и в корреляционном центре обработки РСДБ наблюдений (“off-line”) с дополнительной математической обработкой, повышающей разрешающую способность и снижающей погрешность измерений.

4. Повышение точности измерений и разрешающей способности возможны как аппаратными способами, например на НСС, так и на программном уровне этапа корреляционной обработки РСДБ наблюдений.

5. Представленная технология не требует создания дополнительной инфраструктуры действующих НСС при работе в режиме “КОГЕРЕНТ".

6. В отличие от радиотехнических методов, использующих псевдослучайные последовательности, предложенная технология не требует специально сформированного узкополосного дискретного сигнала и может использоваться на любом интервале времени РСДБ сеанса наземно-космического интерферометра (см. рисунок 10).

7. Использование представленной технологии позволяет нивелировать серьезный недостаток проекта РадиоАстрон, который состоит в невозможности измерений дальности КРТ во время сеансов РСДБ наблюдений в режиме "КОГЕРЕНТ" штатными средствами. Представленная технология позволяет также использовать в качестве калибраторов сигналы исследуемых космических источников (пульсары, квазары и др.) для сопоставления с результатами измерений дистанции между НСС и КРТ.

Литература

1) Зиновьев А.Н. Исследование бортовой квантовой шкалы времени в условиях орбитального полета космического радиотелескопа проекта "РадиоАстрон".// Космич.иссл. 2015, том 53, № 3, с.207-213.

2) Зиновьев А.Н., Коваленко А.В. Технология исследования бортовой квантовой шкалы времени космического радиотелескопа проекта РадиоАстрон с использованием результатов стерео экспериментов в 2013 - 2014гг.// ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАУКИ (АСТРОФИЗИКА), Препринт N12, ФИАН, 2016, ISSN 2410-4914.

3) Зиновьев А.Н. Технология синхронных измерений дальности до космического радиотелескопа в режиме “КОГЕРЕНТ” в условиях орбитального полета. // Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии (ВРК-2018), 17-21 сентября 2018г. Санкт-Петербург, Россия, Тесисы докладов,- СПб.: ИПА РАН, 2018 - 107с.

4) 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.

5) Заславский, Г. С., Захваткин, М. В., Кардашев, Н. С., Ковалев, Ю. Ю., Михайлов, Е. А., Попов, М. В., Соколовский, К. В., Степаньянц, В. А., & Тучин, А. Г. Проектирование коррекции траектории космического аппарата Спектр-Р при наличии погружений его в сферу влияния Луны. Космические исследования, **55**, 305 (2017)

6) Кардашев, Н. С., Крейсман, Б. Б., Погодин, А. В., Пономарев, Ю. Н., Филиппова, Е. Н., & Шейхет, А. И. Проектирование орбиты космического аппарата "СПЕКТР-Р" для наземно-космического интерферометра. Космические исследования, **52**, 366 (2014).

7) Захваткин, М. В., Пономарев, Ю. Н., Степаньянц, В. А., Тучин, А. Г., Заславский, Г. С. Навигационное обеспечение научной миссии "РАДИОАСТРОН". Космические исследования, **52**, 376 (2014).

8) Лисаков, М. М., Войнаков, С. М. Сыров, А. С., Соколов, В. Н., Добрынин, Д. А., Шатский, М. А., Камальдинова, Р. А., Сосновцев, В.В., Рябогин, Н. В., Вьюнитская, Т. Б., & Филиппова, Е. Н. Работа системы ориентации космического аппарата "СПЕКТР-Р". Космические исследования, **52**, 399 (2014).

9) Андреянов, В. В., Кардашев, Н. С., & Хартов, В. В. Наземно-космический радиоинтерферометр "РАДИОАСТРОН". Космические исследования, **52**, 353 (2014).

10) Хартов, В. В., Ширшаков, А. Е., Артюхов, М. И., Казакевич, Ю. В., Воробьев, А. З., Калашников, А. И., Погодин, А. В., Филиппова, Е. Н., & Комовкин, С. В.

Особенности управления миссией "РАДИОАСТРОН". Космические исследования, **52**, 360 (2014)

11) *Андреянов, В. В.* Формат данных и моды наблюдений интерферометра "Радиоастрон". Космические исследования, **53**, 195 (2015).

12) Бургин, М. С., Войцик, П. А., Кутькин, А. М., Лисаков, М. М., Миронова, Е. Н., Соколовский, К. В., & Фадеев Е. Н. Управление и контроль функционирования бортового комплекса научной аппаратуры космического радиотелескопа. Космические исследования, **53**, 199 (2015).

13) Якимов, В. Е. Создание и развитие программного комплекса для планирования наблюдений в проекте "Радиоастрон". Космические исследования, **53**, 242 (2015).

14) Ковалев, Ю. А, Васильков, В. И., Попов, М. В., Согласнов, В. А., Войцик, П. А. Лисаков, М. М., Кутькин, А. М., Николаев, Н. Я., Нижепьский, Н. А., Жеканис, Г. В., & Цыбулев, П. Г. Проект "РАДИОАСТРОН". Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011-2013 ГГ. Космические исследования, **52**, 430 (2014).

15) Бонч-Бруевич А.М., Зиновьев А.Н. и др. Устройство для задержки импульсов. // СССР. Открытия. Изобретения. – 1986 – №14. Авторское Свидетельство на Изобретение **№ 1224997.**

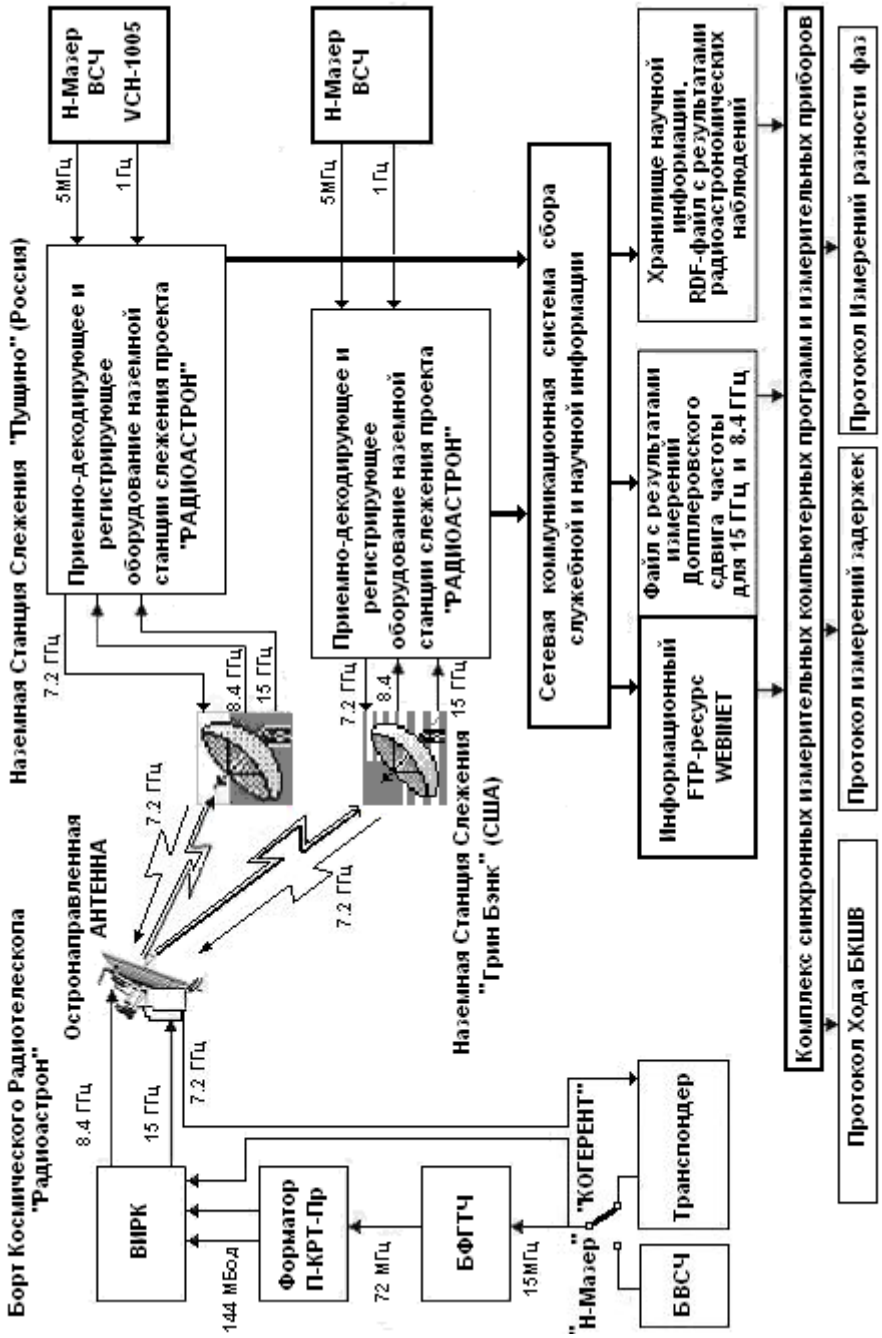

Рисунок 1. Функциональная схема синхронных измерений дальности с использованием эффекта космической реверберации.

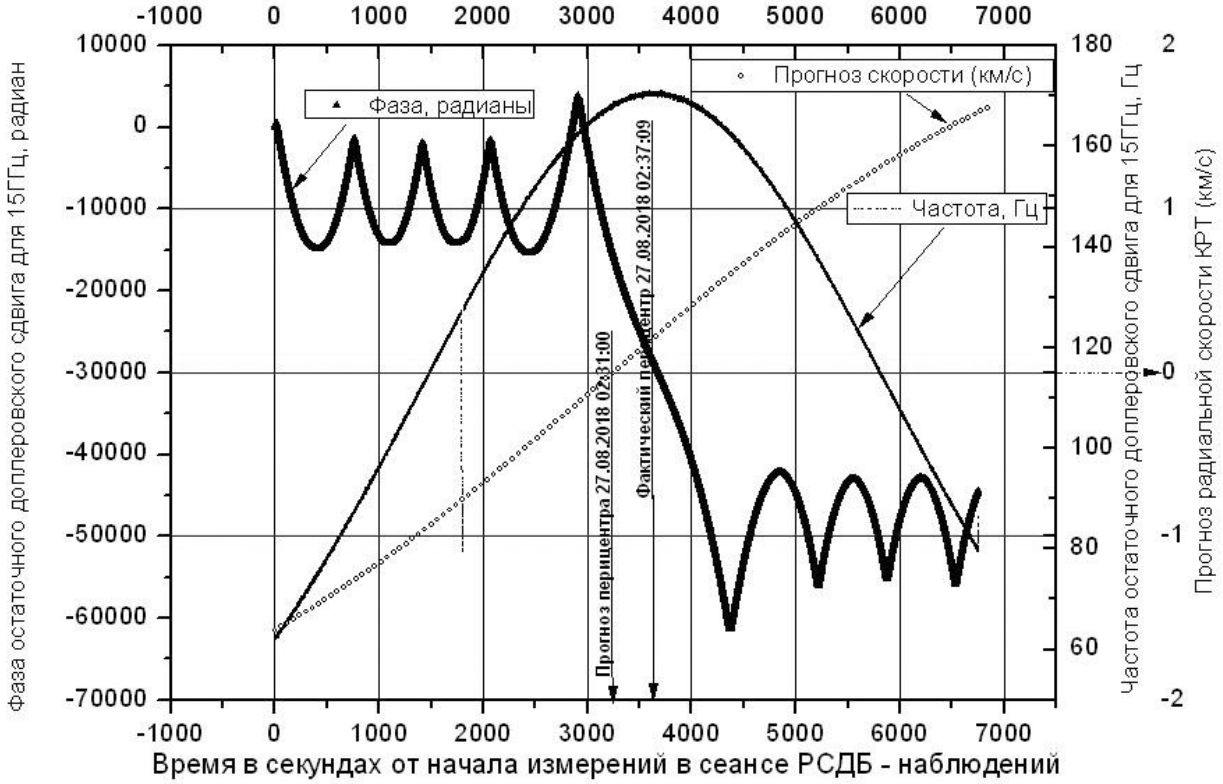

Рисунок 2. Временная диаграмма измерений частоты остаточного доплеровского сдвига и его фазы на сеансе Rags41b, выполненных НСС Грин Бэнк для сигнала КРТ 15ГГц 27.08.2018 04:50 UTC на рубеже 299 и 300 витков орбиты КРТ

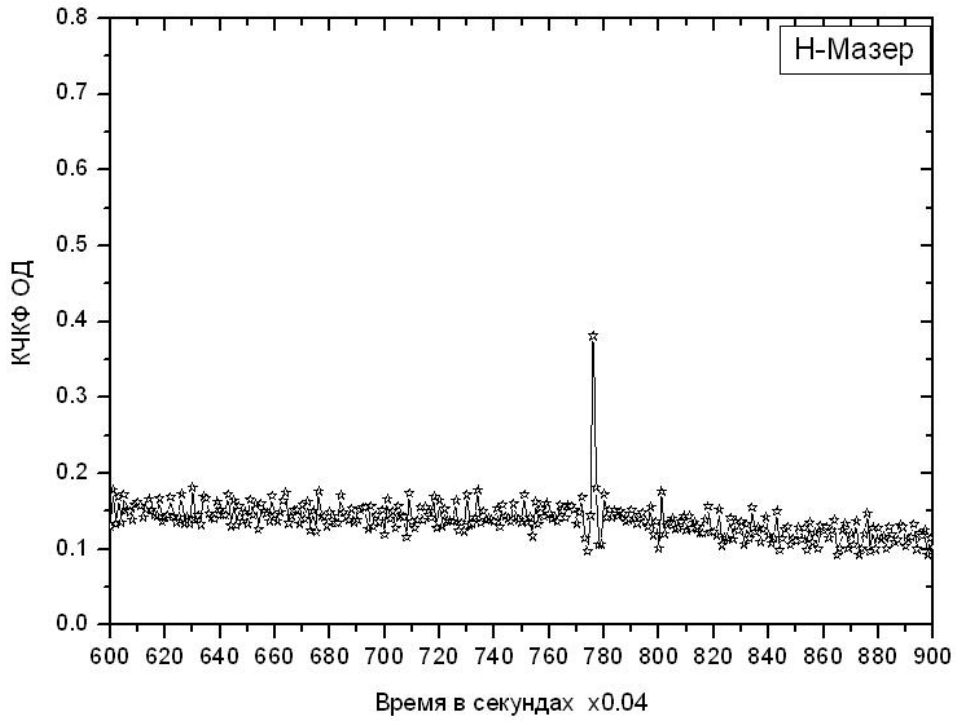

Рисунок 3a

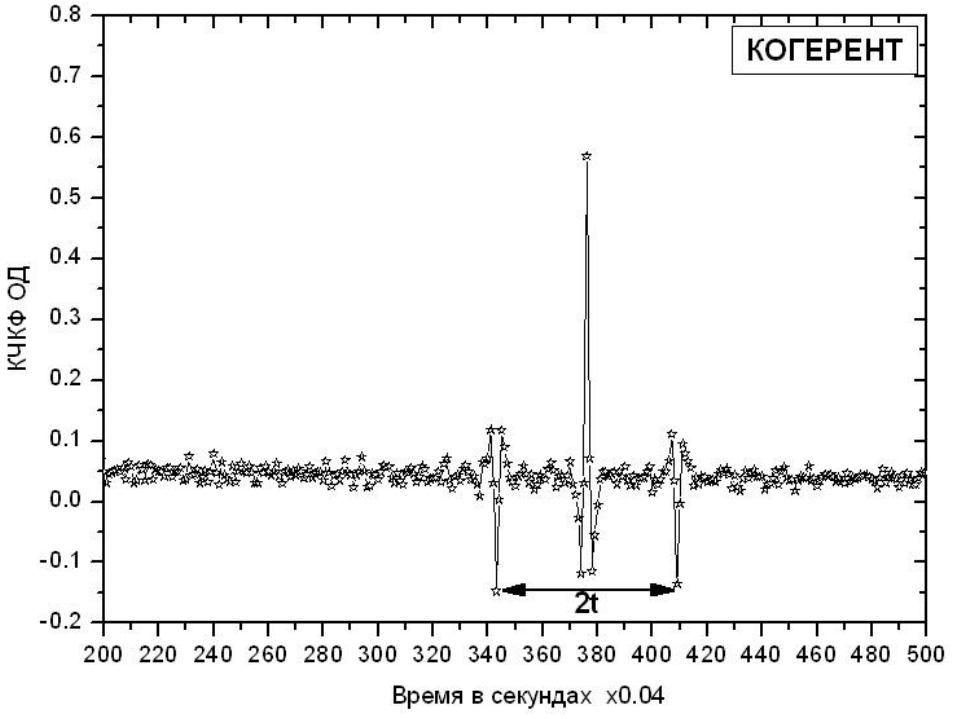

Рисунок 3b.

Эксперимент Raks18cz (27.10.2017). Кросс частотная корреляционная функция:

Рис. 3a - для измерений остаточного доплеровского сдвига, выполненных на НСС Пущино на частотах 15 ГГц и 8.4 ГГц в режиме “H-Мазер”;

Рис. 3b - для измерений, выполненных на НСС Пущино на частотах 15 ГГц и 8.4 ГГц в режиме “КОГЕРЕНТ”.

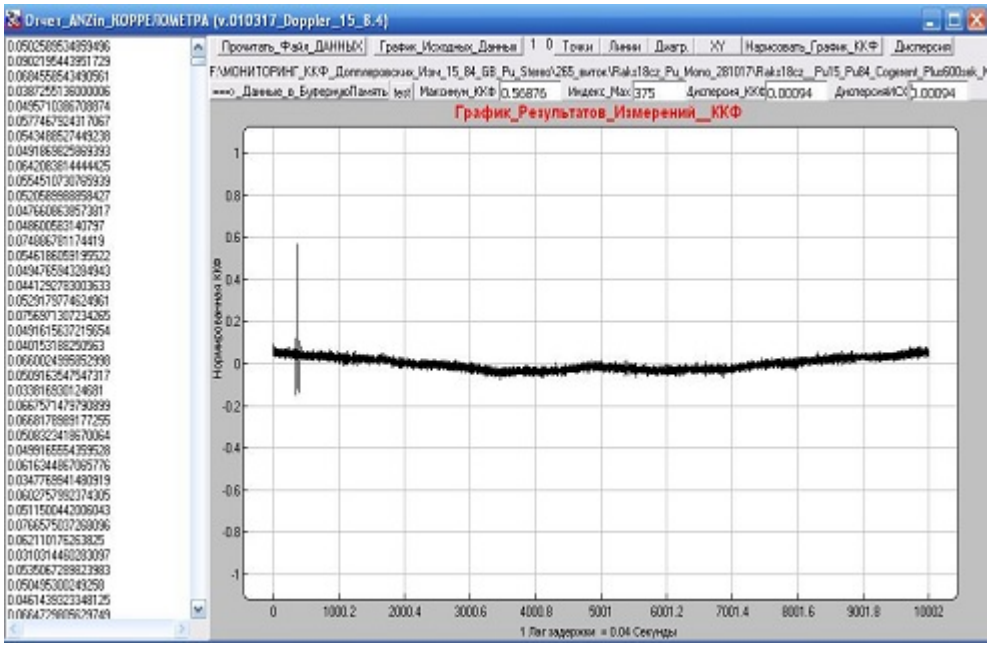

Рисунок 4. Панель контроля и управления коррелометром.

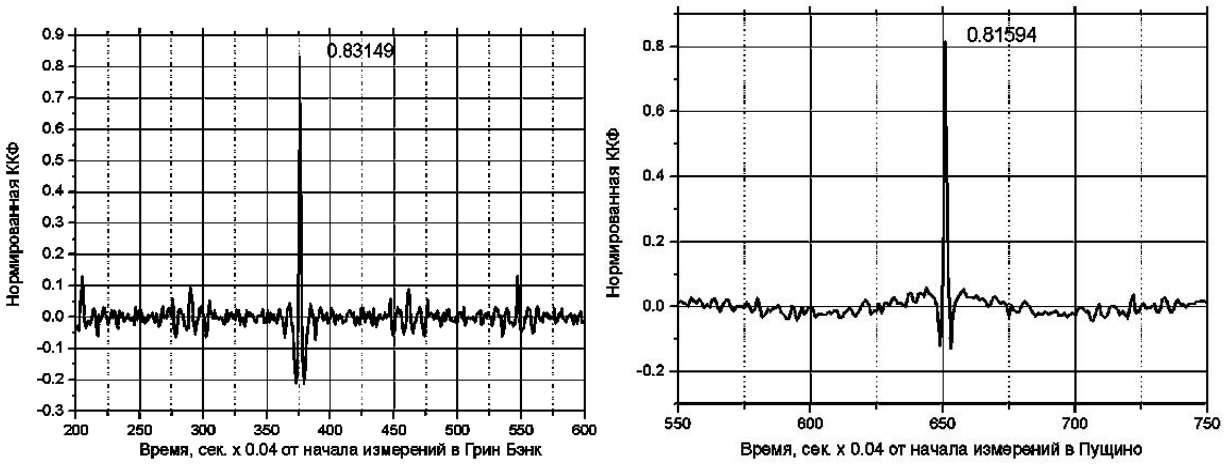

Рисунок 5. Стерео эксперимент Raks12us (16.04.2016). Кроссчастотная корреляционная функция: -- слева для измерений, выполненных на НСС Грин Бэнк на частотах 15 ГГц и 8.4 ГГц в режиме “Н-Мазер”;
- справа для измерений, выполненных на НСС Пущино на частотах 15 ГГц и 8.4 ГГц в режиме “Н-Мазер”.

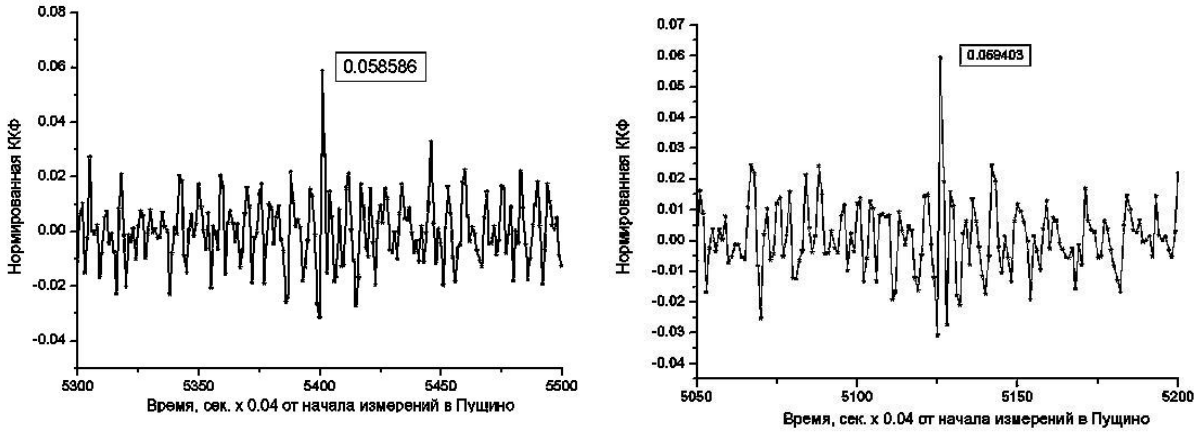

Рисунок 6. Стерео эксперимент Raks12us (16.04.2016). Кроссчастотная корреляционная функция: - слева для измерений, выполненных одновременно на НСС Грин Бэнк и НСС Пущин на
частоте 8.4 ГГц в режиме “Н-Мазер”;
- справа для измерений, выполненных одновременно на НСС Грин Бэнк и НСС Пущин на частоте 15 ГГц в режиме “Н-Мазер”.

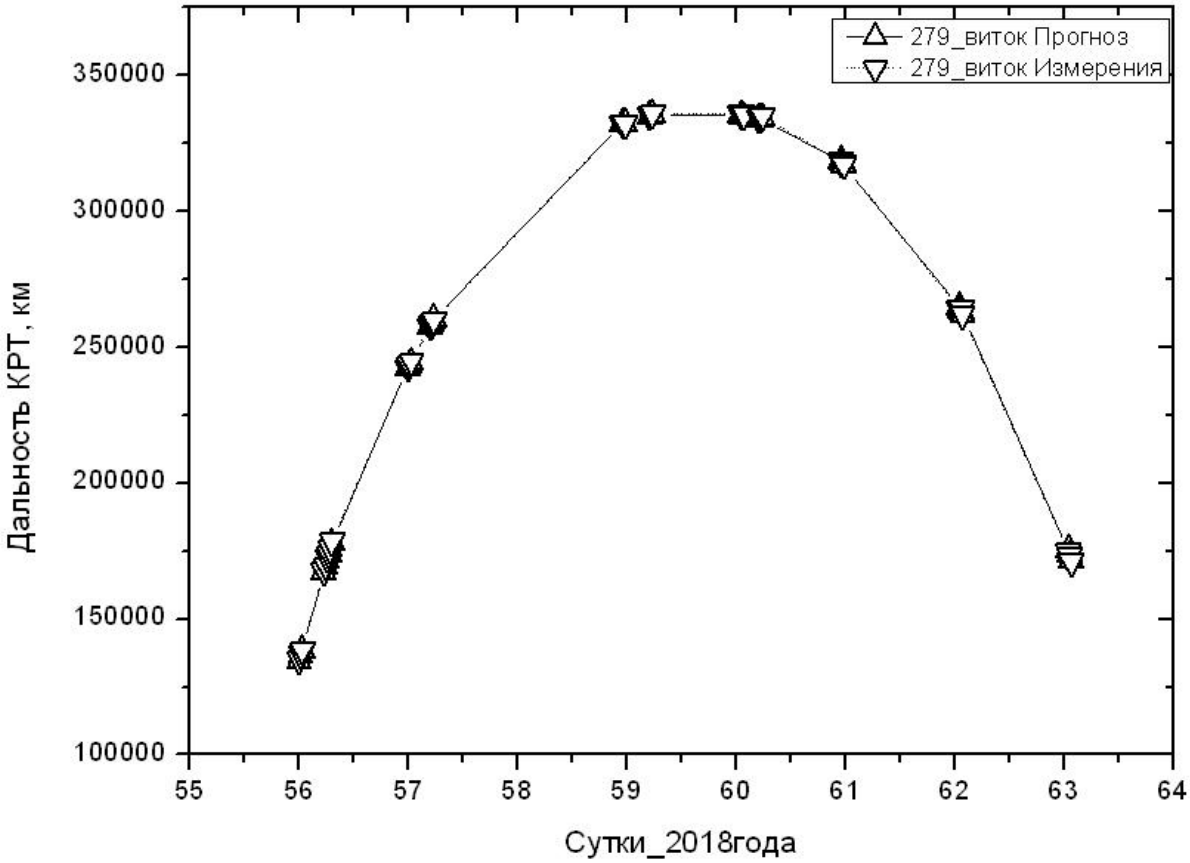

Рисунок 7. Сопоставление результатов синхронных измерений дальности с прогнозными значениями для 279 витка орбиты КРТ (25.02.2018 -06.03.2018). Измерения выполнены ссинхронным (по ШВ НСС Грин Бэнк) измерителем с использованием эффекта космической реверберации.

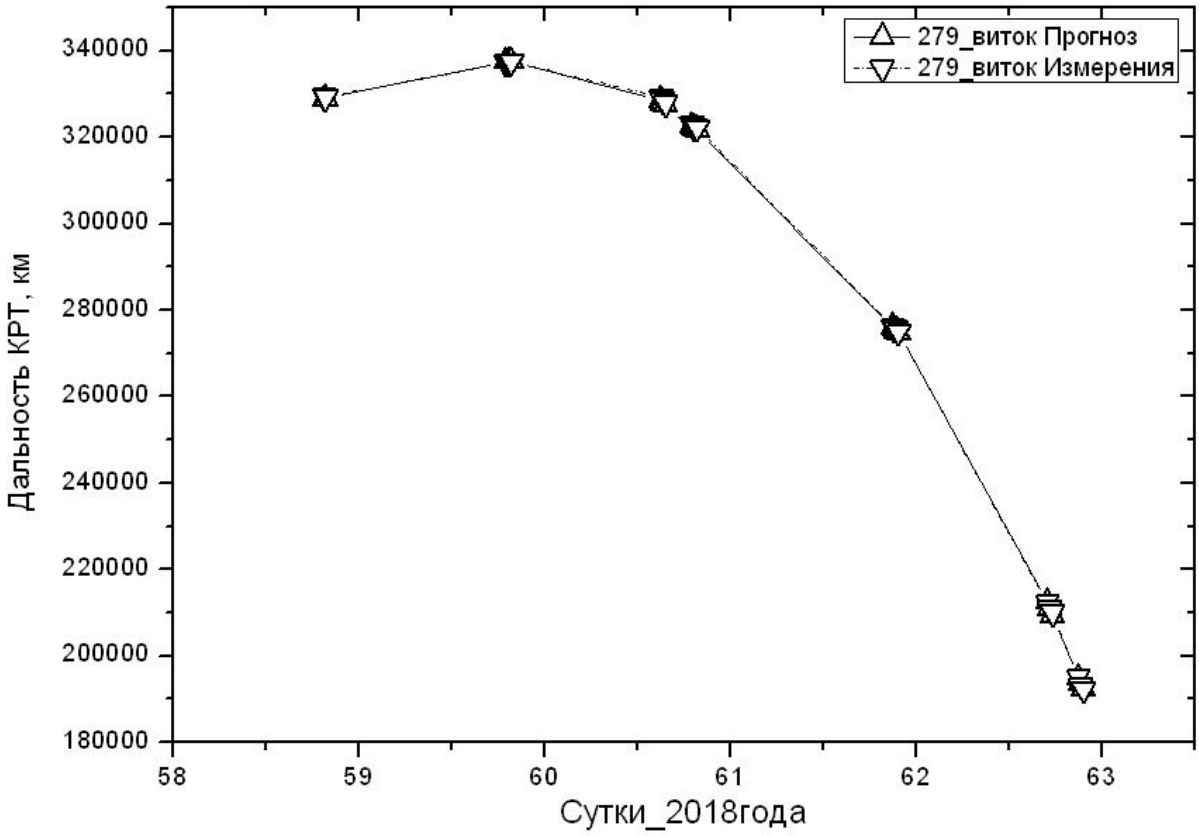

Рисунок 8. Сопоставление результатов синхронных измерений дальности с прогнозными значениями для 279 витка орбиты КРТ (25.02.2018 -06.03.2018). Измерения выполнены синхронным (по ШВ НСС Пущино) измерителем с использованием эффекта космической реверберации.

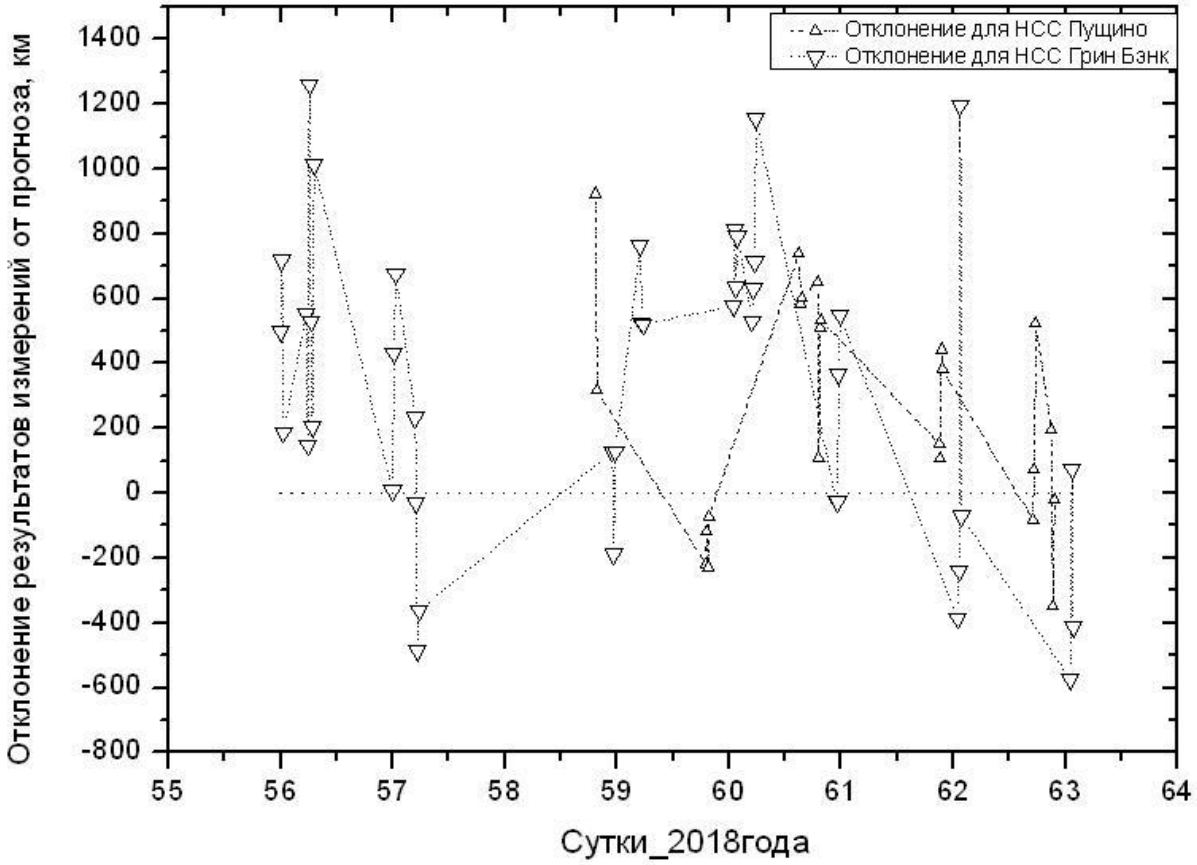

Рисунок 9. Временная диаграмма для сопоставления отклонений результатов синхронных измерений дальности с прогнозными значениями для 279 витка орбиты КРТ (25.02.2018 -06.03.2018)

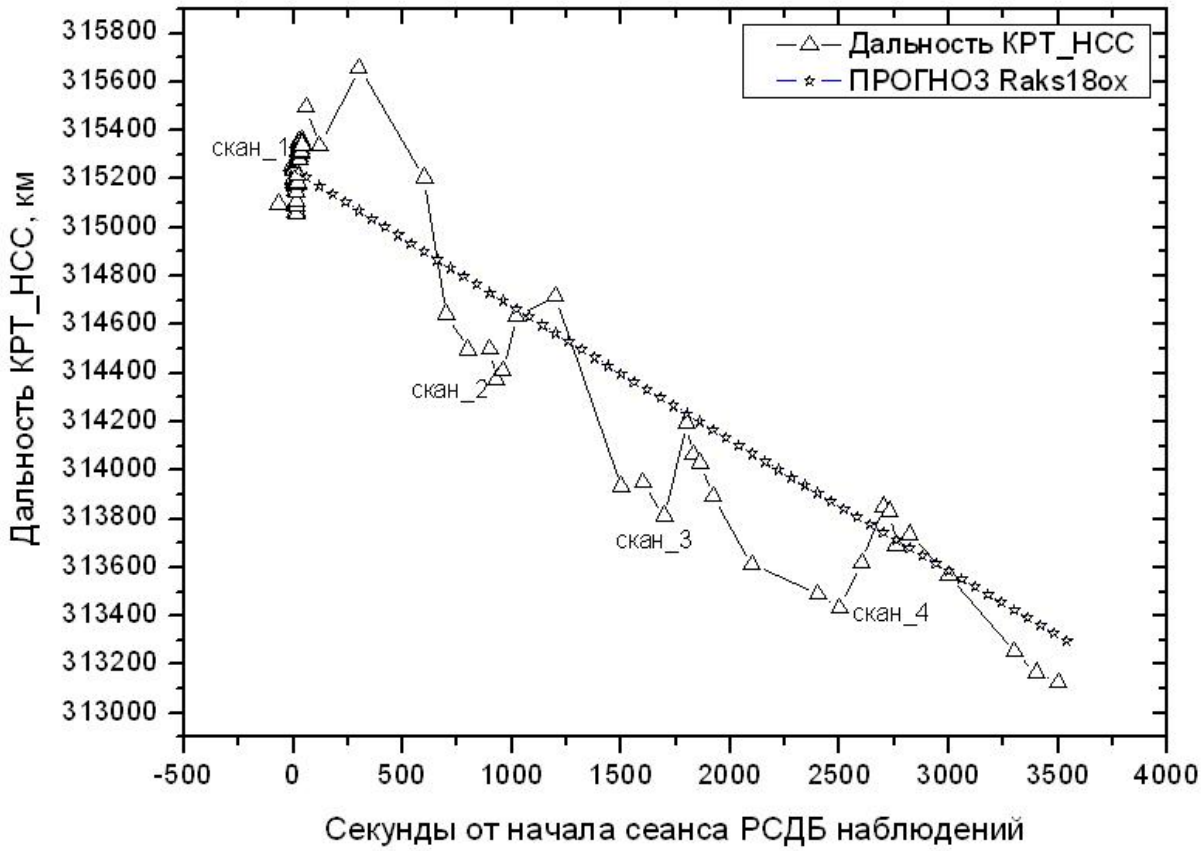

Рисунок 10. Сопоставление результатов синхронных измерений дальности с прогнозными значениями для четырех последовательных сканов сеанса Raks18ox, проведенного НСС Пущино 11.03.2018 16:00:00 UTC (280 виток).

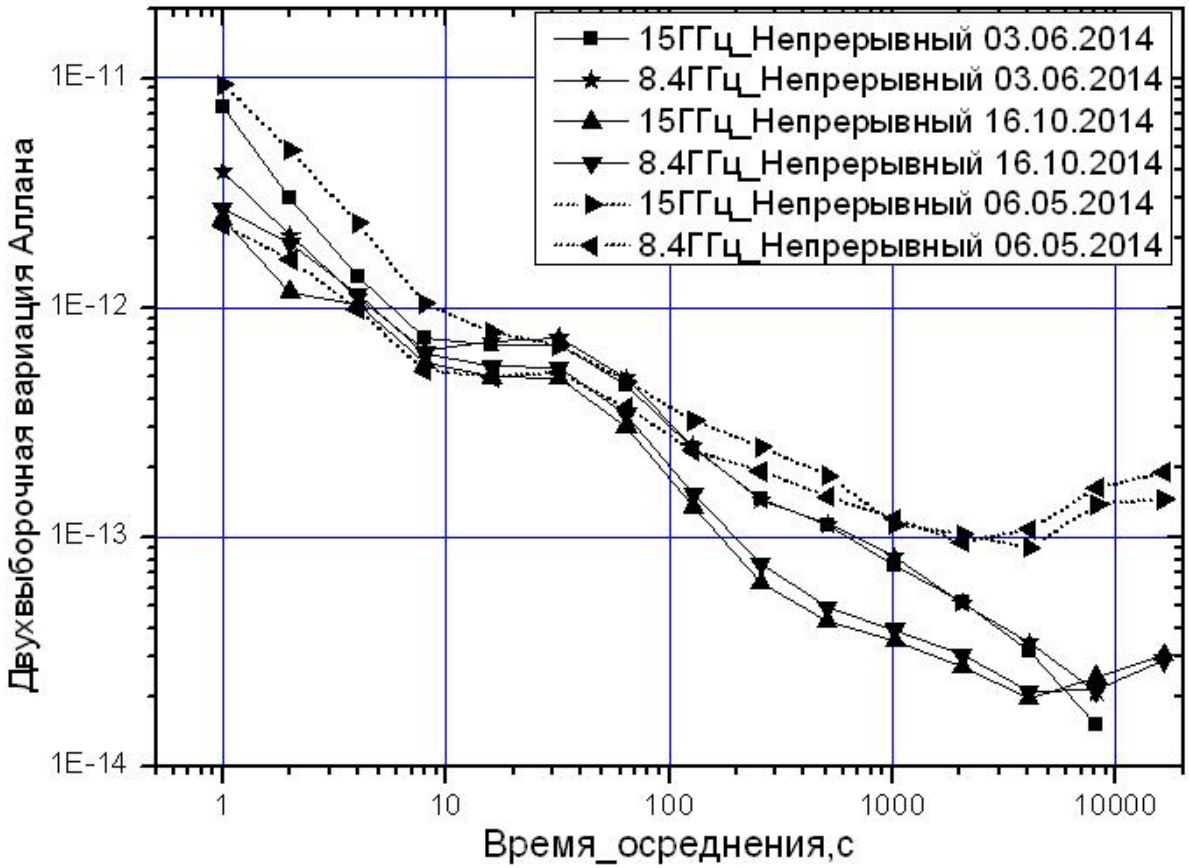

Рисунок 11. Результаты измерений кросс стабильности сигналов КРТ, принятых одновременно двумя НСС (Пущино и Грин Бэнк) при непрерывной работе “Н-Мазера” БВСЧ-2 (VCH-1010 005) во время стерео сеансов.

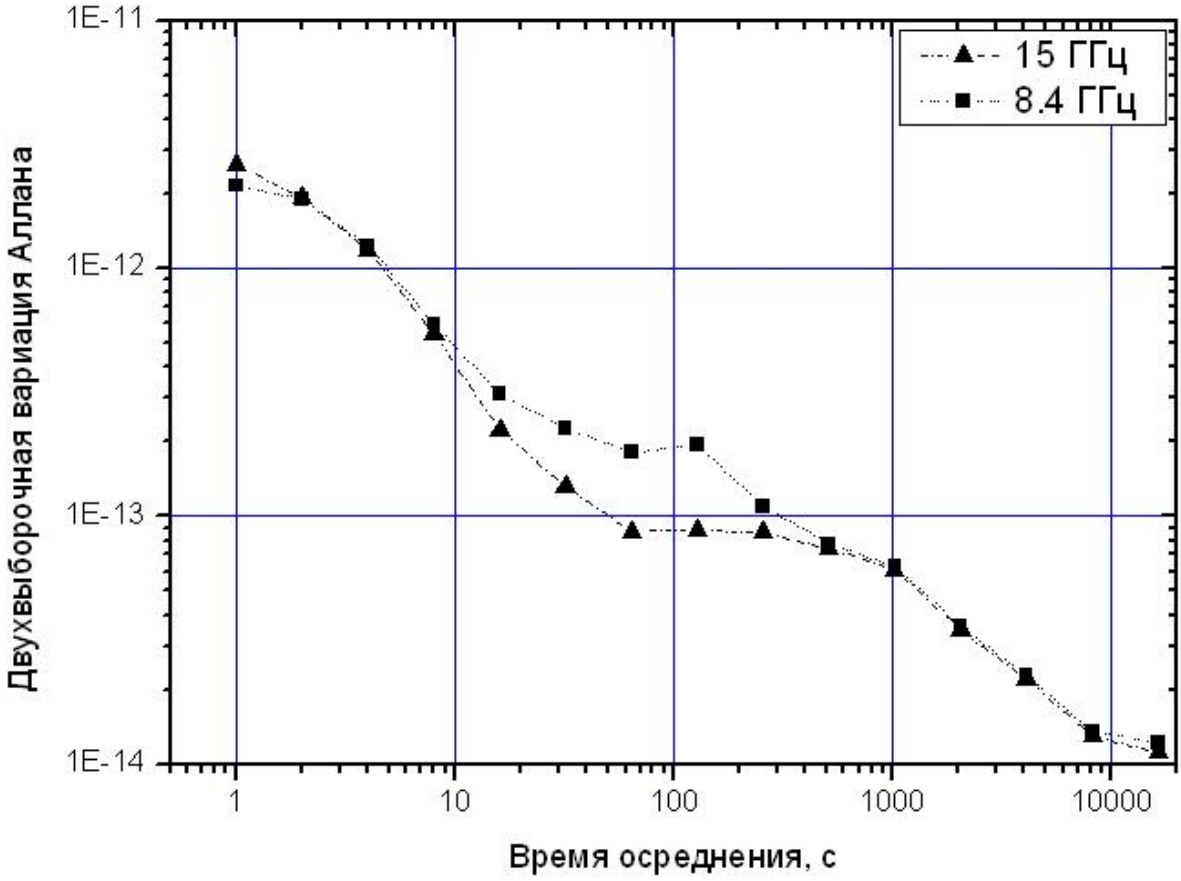

Рисунок 12. Результаты измерений стабильности сигналов КРТ в режиме “КОГЕРЕНТ”, выполненных по данным наблюдений НСС Грин Бэнк во время сеанса Radt08k 15.XI.2018.

Technology of synchronous distance measurements to the space radio telescope RadioAstron project's using the reverberation effect in the conditions of orbital flight

© A. N. Zinoviev

Moscow, Russia.

Abstract

The paper presents the result of detecting a new effect, which consists in the appearance of characteristic responses due to the retransmission of the signal in the direction from the space radio telescope to the hired tracking station in the "COHERENT" mode. The technology, that allows to measure the range from the spacecraft "Spektr-R" to the ground tracking station during the sessions of radio astronomy observations by the ground-space interferometer of the RadioAstron project is proposed. The practical features and advantages of the proposed technology are noted. The ways of increasing the resolution and reducing the range measurement error using the detected effect are listed

Keywords: space radio telescope, cross-frequency correlation function of the axial Doppler, onboard hydrogen standard of frequency (H-maser), phase synchronization loop of the highly informative radio channel, ground tracking station, reverberation.

ACKNOWLEDGMENTS

The RadioAstron project is realized by the Astrospace Center of Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences and by the Lavochkin Research and Production Association under a contract with the Russian Space Agency in collaboration with many scientific and engineering organizations in Russia and other countries.

REFERENCES

1. Zinoviev A.N., Investigation of Onboard Quantum Ttime Scale for Orbital Flight of a Space Radio Telescope (the RadioAstron Project), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2015, Vol.53, No.3, pp.207-213.

2. Zinoviev A.N., Kovalenko A.V., The onboard quantum time scale research with stereo experiment technology in space radio telescope "RADIOASTRON" project, *Preprint of Lebedev Physical Inst., Russ. Acad. Sci*., Moscow, 2016, No.12. ISSN 2410-4914.

3. Zinoviev A.N. Technology of synchronous distance measurements to the space radio telescope in the "COHERENT" mode in the conditions of orbital flight, *Radio telescopes, equipment and methods of radio astronomy (VRK-2018),* 17-21 September 2018, St. Petersburg, Russia, TESIS reports-St. Petersburg.: IPA RAS, 2018-107p.

4. Kardashev N. S , ... Zinoviev A.N., et al. "RadioAstron"—A Telescope with a Size of 300 000 km: Main Parameters and First Observational Results, *Astronomy Reports*, **57**, 153. (2013)

5. Zaslavskii, G. S., Zakhvatkin, M. V., Kardashev, N. S., Kovalev, Yu. Yu., Mikhailov, E. A., Popov, M. V., Sokolovskii, K. V., Stepan'yants, V. A., & Tuchin, A. G. Designing

Corrections for the Trajectory of the Spektr-R Spacecraft in the Event of Immersions into the Moon's Sphere of Influence. Cosmic Research , **55**, 290 (2017)

6. Kardashev, N. S., Kreisman, B. B., Pogodin, A. V., Ponomarev, Yu. N., Filippova, E. N., & Sheikhet, A. I. Orbit Design for the Spektr-R Spacecraft of the Ground-Space Interferometer. Cosmic Research, **52**, 332 (2014).

7. *Zakhvatkin, M. V., Ponomarev, Yu. N., Stepan'yants, V. A., Tuchin, A. G., & Zaslavskiy, G. S.* Navigation Support for the RadioAstron Mission. Cosmic Research, **52**, 342 (2014)

8. Lisakov, M. M., Voinakov, S. M., Syrov, A. S., Sokolov, V. N., Dobrynin, D. A., Shatsky, M. A., Kamaldinova, R. A., Sosnovtsev, V. V., Ryabogin, N. V., Vyunitskaya, T. B., & Filippova, E. N. Operation of the Spektr-R Orientation System. Cosmic Research, **52**, 365 (2014)

9. Andreyanov, V. V .Data Format and Observational Modes for the RadioAstron Interferometer. Cosmic Research, **53**, 182 (2015).

10. Andreyanov, V. V., Kardashev, N. S., & Khartov, V. V. Space-Ground Radio Interferometer RadioAstron. Cosmic Research, **52**, 319 (2014)

11. *Khartov, V. V., Shirshakov, A. E., Artyukhov, M. I., Kazakevich, Yu. V., Vorob'ev, A. Z., Kalashnikov, A. I., Pogodin, A. V., Filippova, E. N., & Komovkin, S. V.* Features of RadioAstron Mission Control. Cosmic Research, **52**, 326 (2014)

12. Burgin, M. S., Voytsik, P. A., Kutkin, A. M., Lisakov, M. M., Mironova, E. N., Sokolovsky, K. V., & Fadeev, E. N. Monitoring and Control of Onboard Scientific Equipment of the Space Radio Telescope. Cosmic Research, **53**, 186 (2015).

13. Yakimov, V. E. Creation and Development of the Software Complex for Scheduling Observations in the RadioAstron Project. Cosmic Research, **53**, 226 (2015).

14. *Kovalev, Yu. A., Vasil'kov, V. I., Popov, M. V., Soglasnov, V. A., Voitsik, P. A., Lisakov, M. M., Kut'kin, A. M., Nikolaev, N. Ya., Nizhel'skii, N. A., Zhekanis, G. V., & Tsybulev, P. G.* The RadioAstron Project: Measurements and Analysis of Basic Parameters of Space Telescope in Flight in 2011-2013. Cosmic Research, **52**, 393 (2014)

15. BonchBruevich A.M. Zinoviev A.N., et al., A pulse signal delay device, USSR. *Otkrytiya. Izobreteniya*, 1986, no. 14. Inventor's certificate no. 1224997.

Сведения об авторе.

1. Зиновьев Алексей Николаевич; Zinoviev Alexis Nikolaevich.

2. Кандидат технических наук; Candidate of technological sciences.

3. Неработающий пенсионер; Nonworking pensioner.

4. anzin2019@yandex.ru

5. 01.04.03 Радиофизика; 01.04.03 Radio physics.