

УДК 520.6.05,52-323.2

РАБОТА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА СПЕКТР-Р

© 2014 г. М. М. Лисаков¹, С. М. Войнаков³, А. С. Сыров², В. Н. Соколов², Д. А. Добрынин²,
М. А. Шатский², Р. А. Камальдинова², В. В. Сосновцев², Н. В. Рябогин²,
Т. Б. Вьюницкая², Е. Н. Филиппова³

¹Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва
lisakov@asc.rssi.ru

²Московское опытно-конструкторское бюро “МАРС”, г. Москва
office@tokb-mars.ru

³НПО им. С.А. Лавочкина, г. Химки
voinakov@laspace.ru; flen@laspace.ru

Поступила в редакцию 16.12.2013 г.

В работе представлены оценки погрешностей наведения и поддержания ориентации *Спектр-Р* по данным астродатчиков и гироскопического измерителя вектора угловой скорости, проведено сравнение расчетных значений с наблюдаемыми. Показано, что достигаемая точность наведения значительно превышает требуемую и не зависит от количества используемых для этого астродатчиков, что параметры стабилизации соответствуют ожидаемым. Описан оригинальный метод обработки юстировочных наблюдений космического радиотелескопа в диапазоне 1.35 см, с помощью которого найдено систематическое отклонение 2.5' его реальной электрической оси от номинального углового положения.

DOI: 10.7868/S0023420614050094

ВВЕДЕНИЕ

Бортовой комплекс управления (БКУ)¹ КА *Спектр-Р* предназначен для обеспечения функционирования аппарата на рабочей орбите и выполнения целевой задачи — наблюдения источника космического радиотелескопа (КРТ). Условием осуществления этого является выполнение заданных точностных требований и ограничений на ориентацию КА. Передача научных данных на наземные станции управления и слежения осуществляется непосредственно в ходе наблюдений через подвижную остронаправленную антенну (ОНА) высокоинформативного радиоконкомплекса КА.

Основными функциями БКУ являются: управление угловым движением КА и движением центра масс; управление функционированием смежных систем, устройств и агрегатов (СС) КА; формирование телеметрических параметров для оценки состояния БКУ и проведения на Земле обработки данных, полученных при юстировке научной аппаратуры в полете; расчет движения центра масс по заданным с Земли начальным условиям и на основе этого расчет углов разворота

та двухстепенного привода ОНА для наведения ОНА на заданную наземную станцию.

БКУ функционирует в следующих основных режимах: постоянная солнечная ориентация (ПСО); инерциальная ориентация (ИНО) — трехосная стабилизация КА относительно заданного программно положения по информации ГИВУС (см. ниже) с астрокоррекцией уходов ГИВУС или без нее; выдача корректирующего импульса (ВКИ); “закрутка” для последующей пассивной гироскопической стабилизации КА (ГС).

В БКУ предусмотрен набор “типовых полетных операций”, комбинируя которые и задавая с Земли их параметры можно во время полета “конструировать” разнообразные угловые маневры КА, включая маневры для калибровки командных приборов и определения взаимного углового положения командных и научных приборов.

Задание и определение ориентации производится относительно второй экваториальной системы координат — инерциальной системы координат (ИСК) стандартной эпохи J2000.0.

Программная ориентация визирной системы координат (ВСК) КА либо задается в виде кватерниона по отношению к ИСК в составе командно-программной информации (КПИ), поступающей с Земли, либо автономно формируется БКУ изме-

¹ <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/documents/rauh/en/rauh.pdf>.

няющейся во времени на основе данных КПИ. Определения систем координат КА и КРТ приведены соответственно в [2] и [3].

В состав БКУ входят: (а) бортовая цифровая вычислительная система (БЦВС) с блоком управления и коммутации; (б) блоки силовой автоматики; (в) командные приборы (КП): гироскопический измеритель вектора угловой скорости (ГИВУС) с четырьмя измерительными каналами разработки НИИ ПМ им. В.И. Кузнецова; звездные датчики — три астродатчика АД-1; датчики ориентации на Солнце — два солнечных датчика положения СДП-1; (г) инерционные исполнительные органы — комплекс управляющих двигателей-маховиков (ДМ) с четырьмя ДМ разработки НИИ Командных приборов.

Кроме этого в качестве исполнительных органов БКУ использует входящие в состав двигательной установки двигателя стабилизации (ДС) и коррекции (ДК). ДС используются для гашения угловых скоростей после отделения КА, построения ПСО, разгрузки ДМ, “закрутки” КА, стабилизации КА по каналу вращения при ВКИ с помощью ДК, для выдачи малых корректирующих импульсов, а также при парировании нештатных ситуаций.

После выведения КА на целевую орбиту запускается автоматическая циклограмма управления начального участка, по которой осуществляются: гашение угловых скоростей отделения, перевод КА в режим ПСО, обеспечивающий ориентацию панелей солнечной батареи (СБ) на Солнце в исходном после раскрытия положении с целью создания положительного энергопритока и необходимые тепловые режимы. После ее окончания и астроопределения текущей ориентации с помощью астродатчиков КА переводится в режим автономного управления — поддержания ориентации КА в режиме ИНО, обеспечивающей нормальное функционирование всех бортовых систем, и ожидания ввода полетных заданий (ПЗ) для выполнения последующих операций.

Программа функционирования КА строится таким образом, чтобы во время интерферометрических или юстировочных наблюдений исключались возмущения угловой стабилизации КА и возмущения движения его центра масс. Поэтому коррекция орбиты, разгрузка ДМ, развороты панелей СБ назначаются вне участков наблюдений.

Управление ориентацией КА в сеансах научных наблюдений по сигналам ГИВУС и АД. В техническом задании (ТЗ) оговорены следующие требования к параметрам ориентации: погрешности ориентации (3σ) ВСК КА без учета погрешностей взаимной привязки приборных систем координат (ПСК) КП и ВСК по каждой из осей ВСК не более $18''$; стабилизационные отклонения не более $\pm 2.5''$ от среднего значения на любом интервале продол-

жительностью в 120 с; угловые скорости стабилизации по осям Y и Z ВСК не более $2 \cdot 10^{-4}$ град/с, по оси X — $5 \cdot 10^{-4}$ град/с.

Управление ориентацией КА строится на принципах корректируемой бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Заданная в ТЗ точность ориентации достигается использованием для управления ориентацией сигналов ГИВУС и АД и функционированием подсистемы информационного обеспечения БКУ в режиме непрерывной астрокоррекции (НАК). Режим НАК предусматривает непрерывную работу одновременно двух АД и коррекцию параметров ориентации КА, вычисляемых по сигналам ГИВУС при частоте поступления астроданных 0.5 Гц.

Проведение калибровки дрейфов ГИВУС задается из центра управления полетом (ЦУП) вводом на борт КА соответствующего ПЗ. Плановая периодичность проведения калибровки дрейфов ГИВУС зависит от стабильности систематических дрейфов и в среднем составляет один раз в неделю. Если сеанс научных наблюдений выполняется при постоянной ориентации и имеет достаточно большую продолжительность (от 6 до 18 ч), на его фоне может быть выполнена калибровка дрейфов ГИВУС.

Калибровка масштабных коэффициентов ГИВУС и взаимного углового положения АД-1 и ГИВУС была выполнена сотрудниками МОКБ “Марс” один раз на начальном этапе функционирования КА. Проведение данной операции позволило устранить рассогласования систем координат КП, вызванные неточностью наземных обмеров и действием перегрузок на этапе выведения КА на орбиту.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ КА СПЕКТР-Р НА ИНТЕРВАЛЕ НАУЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

К основным составляющим, определяющим общую погрешность ориентации КА *Спектр-Р*, следует отнести:

Δ_1 — погрешности определения параметров ориентации КА непосредственно после поступления очередных данных от АД (каждые 2 с) с учетом включения их в обработку фильтром Калмана;

Δ_2 — погрешности вычисления параметров ориентации по сигналам ГИВУС внутри 2-х секундного интервала между поступлениями данных от АД за счет нескомпенсированных дрейфов ГИВУС;

Δ_3 — погрешности вычисления параметров ориентации по сигналам ГИВУС, обусловленные наличием в них шумовых составляющих;

Δ_4 — погрешности системы стабилизации.

Независимость приведенных погрешностей следует из различной, независимой природы их возникновения. Рассмотрим уровни этих погрешностей, приведя их к эквивалентным погрешностям определения и управления ориентацией КА. Влияние остальных факторов на точность ориентации КА устраняется по результатам калибровки масштабных коэффициентов ГИВУС и взаимного углового положения КП.

Погрешности определения параметров ориентации КА по данным от АД. Погрешность астродатчика состоит из трех компонент: (1) шумовой компоненты; (2) систематической компоненты, которая проявляется как периодическая при движении изображения звезды по ПЗС-матрице; (3) систематической компоненты, включающей постоянную и низкочастотную составляющие.

Третья компонента погрешности устранена в результате калибровки астродатчиков на начальном этапе полета с обработкой на Земле данных, полученных по телеметрии. По ее результатам на борт вводится КПИ, с помощью которой корректируются выходные данные астродатчиков.

Вторую компоненту погрешности определяют как микродисторсию – методическую погрешность, величина которой зависит от положения изображения звезд относительно растровой структуры ПЗС-матрицы [4]. При наличии угловой скорости она проявляется как псевдослучайная, периодическая. При отсутствии программного углового движения КА относительно ИСК и малых амплитудах стабилизации данная компонента становится неустранимой систематической погрешностью.

В сеансе астровизирования, проходящем при наличии небольшой угловой скорости КА (15–30 угл. с/с), фильтр Калмана, используемый для расчета астроориентации, устраняет шумовую и периодическую компоненты погрешности астродатчика. В противном случае фильтр устраняет только шумовую компоненту погрешности и не устраняет вторую компоненту, которая становится систематической, поскольку не проявляет себя при отсутствии движения изображения звезды по ПЗС-матрице. Таким образом, погрешность астроориентации при небольшой угловой скорости меньше, чем при задании постоянной ориентации ВСК относительно ИСК.

БКУ определяет астроориентацию КА относительно ИСК через ориентацию измерительной системы координат астродатчика, которая является виртуальной и идентифицируется через выходные данные астродатчика.

Погрешности астроориентации, рассматриваемые ниже, это погрешности ориентаций измерительных СК откалиброванных съюстированных астродатчиков относительно ИСК.

Оценку сверху δ для результирующей погрешности астроориентации измерительной СК астродатчика можно представить как $\delta = \alpha + f$, где f – погрешность фильтрации из-за первой и второй компонент погрешности астродатчика (вторая компонента погрешности астродатчика в сеансе астровизирования, проводимого при задании постоянной ориентации ВСК относительно ИСК, не фильтруется); α – оценка сверху вклада в погрешность астроориентации, обусловленного систематической компонентой погрешности астродатчика. Параметр f рассчитывается как $f = 3\sqrt{Sp(L)}$, где $L(3 \times 3)$ – ковариационная матрица оценки погрешности элементов вектора эйлера поворота, переводящего ориентацию ИСК ведущего базиса ГИВУС, рассчитанную фильтром, в истинную ИСК при отсутствии систематической погрешности астродатчика. Параметр α представляется как $\alpha = \epsilon k$, где ϵ – ошибка компенсации третьей компонентой погрешности астродатчика.

При угловой скорости 15 угл. с/с данный параметр находится на уровне 4". Для сеанса астровизирования, проводимого при задании постоянной ориентации ВСК относительно ИСК, к данной величине добавляется вторая компонента погрешности астродатчика, достигающая 20". Через k обозначен коэффициент, зависящий от взаимной конфигурации звезд в кадре, взятых в расчет ориентации, и вычисляемый как $k = \sqrt{R/2}$, где $R = -Sp(I^{-1})$, $I = \sum_{i=1}^N \hat{s}^{(i)} \hat{s}^{(i)}$.

Здесь через N обозначено количество находящихся в одном кадре звезд, взятых в обработку для расчета ориентации, а через $\hat{s}^{(i)}(3 \times 3)$ – косо-симметричная матрица, соответствующая столбцу проекций единичного вектора, направленного на i -ю наблюдаемую звезду.

Оценка погрешности ориентации через след ковариационной матрицы погрешности оценки вектора состояния фильтра Калмана на интервале 3 мес. представлена рис. 1. Данная оценка вбирает в себя все систематические погрешности опознавания звезд на КА, включая погрешности связанные с взаимным расположением наблюдаемых звезд, например малыми угловыми расстояниями между ними. Оценку погрешности астроориентации можно рассматривать как интегральную результирующую характеристику сеанса астровизирования. Значение в каждый момент времени зависит от количества звезд в поле зрения АД и их взаимного расположения. Оценка погрешности ориентации через след ковариационной матрицы погрешности оценки вектора состояния фильтра Калмана имеет величину не более 3".

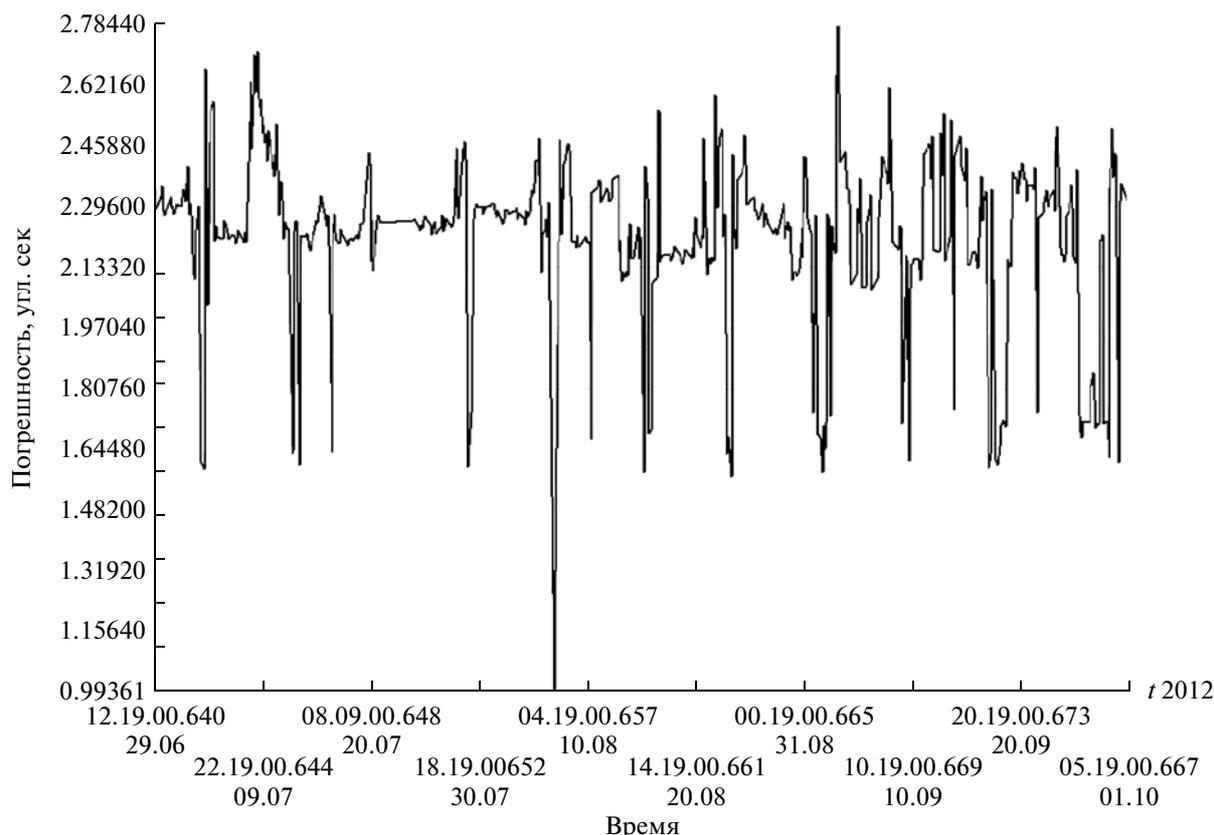


Рис. 1. Зависимость расчетной погрешности ориентации (угл. с) от времени.

Погрешности системы стабилизации. В сеансе научных наблюдений в закон управления подключается интегральная составляющая. По данным ТМИ после этого статическая ошибка сводится к 0° , а амплитуда угловых колебаний по осям X, Y, Z ВСК не превышает соответственно: $0.33''$, $0.72''$, $0.36''$. Амплитуда колебаний по угловым скоростям по осям X, Y, Z ВСК не превышает соответственно 0.000025 , 0.00003 , 0.00002 град/с.

РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ КА СПЕКТР-Р НА ИНТЕРВАЛЕ НАУЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для значения общей погрешности ориентации Σ можно записать: $\Sigma = \sum_{i=1}^n \Delta_i$, где Δ_i – независимые частные составляющие погрешности ($i = 1, n$).

Тогда дисперсия общей погрешности может быть определена через значения частных дисперсий:

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sum_1^n \sigma_{\Delta_i}^2 \text{ или } 3\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum (3\sigma_{\Delta_i})^2}.$$

Независимые частные факторы вносят следующий вклад в общую предельную погрешность ориентации КА в режиме НАК: $\Delta_1 = 3''$;

$\Delta_2 = 0.004''$; $\Delta_3 = 0.9''$; $\Delta_4 = 0.72''$. Предельное значение общей погрешностей обеспечения ориентации КА по каждой из осей ВСК составляет:

$$3\sigma_{\Sigma} = \sqrt{3^2/3 + 0.004^2 + 0.9^2 + 0.72^2} = 2.3''.$$

Условия функционирования БКУ для выполнения требований по точности ориентации КА Спектр-Р на интервале научных наблюдений. Приведенные выше оценки показывают, что требования ТЗ по точности обеспечения ориентации КА в сеансах научных наблюдений выполняются при соблюдении следующих условий:

1. Остаточные дрейфы ГИВУС по каждой из осей ВСК поддерживаются за счет периодически проводимых калибровок на уровне не более 0.002 град/ч.

2. Определение ориентации КА относительно ИСК выполняется в режиме НАК с использованием двух АД. Необходимая для проведения научных наблюдений точность ориентации достигается с 2–4-ой минуты от начала режима НАК.

3. Выполнена взаимная угловая “привязка” КП и электрической оси КРТ.

4. Возмущения от вращения панелей СБ на интервале научных наблюдений отсутствуют, а возмущения от разворотов подвижной ОНА находятся в допустимых пределах.

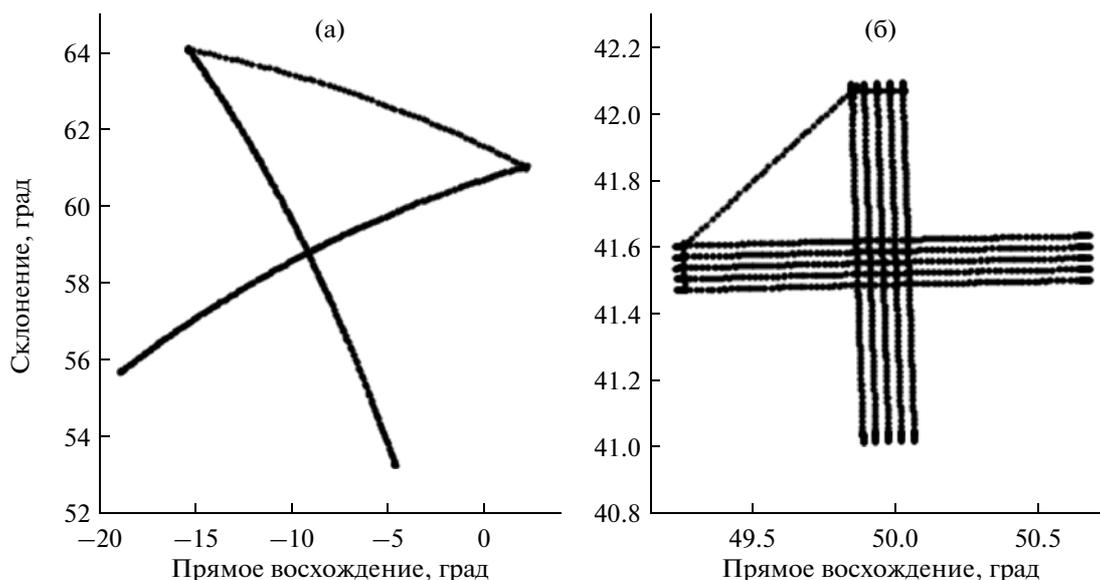


Рис. 2. Траектория оси X : а – в диапазонах 18 и 92 см. Длина скана 5° , скорость вращения КА 36 угл. с/с; б – в диапазонах 6 и 1.35 см. Длина скана 1° , расстояние между сканами 2.5', скорость вращения КА 18 угл. с/с. На рис. 5 сканов вокруг оси Y ВСК и 5 сканов вокруг оси Z (по 2 прохода на каждом скане).

5. Для каждого сеанса научных наблюдений выбор пары АД из числа трех имеющихся в составе БКУ должен производиться как с учетом отсутствия засветки их Землей и Луной (см. [3]), так и наибольшей совокупной информативности звездного неба в их полях зрения.

ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ТОЧНОСТИ НАВЕДЕНИЯ КРТ

Первые наблюдения с помощью КРТ проекта “РадиоАстрон” были проведены в ноябре 2011 года. К моменту написания статьи проведено более 900 интерферометрических и несколько десятков юстировочных наблюдений.

Большая часть интерферометрических наблюдений проходит с использованием на борту программы формирования телеметрических кадров, предусматривающей поступление данных о текущей ориентации ВСК из БКУ в телеметрическую систему примерно 1 раз в минуту. Длительность сеансов находится, как правило, в диапазоне от 40 мин до 1 ч. Таким образом, для большинства интерферометрических наблюдений имелось не менее 40 измерений углового положения по каждой из осей ВСК. Для настоящей статьи использовались и анализировались данные о направлении только оси X ВСК.

Для определения параметров КРТ регулярно проводятся специальные юстировочные сеансы, в которых КРТ работает в режиме одиночной антенны. Во время этих сеансов в бортовое запоминающее устройство (ЗУ) записываются данные радиометрических выходов одного или двух при-

емников в обеих поляризациях, а также информация об ориентации, которая поступает каждую секунду. После проведения юстировочного сеанса данные из ЗУ передаются на Землю по служебному радиоканалу.

При юстировочных наблюдениях электрическая ось КРТ сканирует небольшую площадку на небесной сфере согласно одной из нескольких предусмотренных программ. Сканирование осуществляется сканами, реализуемыми вращением КА вокруг оси Y или Z . По каждому скану может быть сделано несколько проходов. Переход от одного скана к другому осуществляется по переходному участку. Характерные траектории движения оси X ВСК в экваториальных координатах при проведении юстировочных наблюдений приведены на рис. 2. Каждой точке на этой плоскости соответствует определенное направление оси X ВСК, полученное по данным телеметрии.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

По кватернионам² ориентации (c_1, c_2, c_3, c_4), получаемым в составе телеметрической информации (ТМИ), можно вычислить экваториальные координаты ориентации (прямое восхождение α , склонение δ) всех трех осей ВСК по известным формулам. Для оси X ВСК они имеют вид:

$$\alpha = \arctg \frac{2(c_1c_4 + c_2c_3)}{c_1^2 + c_2^2 - c_3^2 - c_4^2}, \quad \delta = \arcsin(2(c_2c_4 - c_1c_3)).$$

² <http://en.wikipedia.org/wiki/Quaternion>.

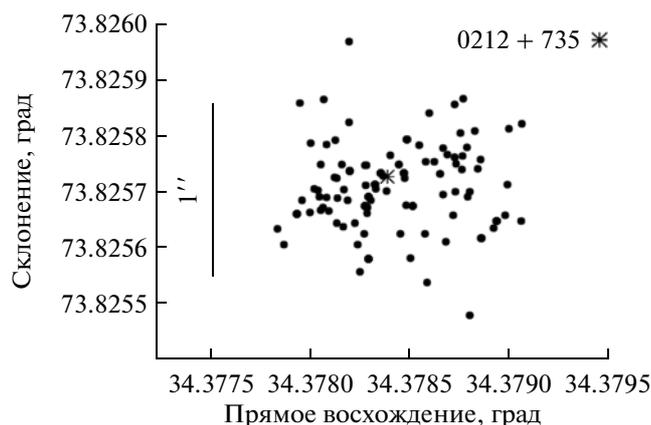


Рис. 3. Характерное изменение ориентации оси X при проведении интерферометрических наблюдений.

Обработка данных интерферометрических и юстировочных наблюдений производилась по-разному. При обработке интерферометрических сеансов рассматривалась разница координат ориентации оси X ВСК и координат источника и оценивались параметры распределения этой разности. Так, полный разброс точек по каждой из координат α , δ характеризует точность работы системы стабилизации КА, а разность между медианным значением положения оси X в течение сеанса наблюдений и истинным положением исследуемого источника на небе характеризует некомпенсируемую ошибку определения ориентации (точность наведения). Для осуществления такого анализа было разработано специальное программное обеспечение и создана база данных, содержащая координаты наведения КРТ для всех наблюдений. На рис. 3 показаны данные наведения КРТ для одного из первых интерферометрических сеансов rafs02. Каждая точка соответствует одному положению оси по данным телеметрии (шаг по времени 60 с). Отмечено положение исследуемого источника 0212+735. Полный разброс точек не превышает $1.5''$.

При анализе юстировочных сеансов кроме координат оси X учитывались также и радиометрические отклики приемников, что позволяло исследовать зависимость мощности на выходе приемника от координат наведения КРТ. Эта возможность КРТ уникальна и дает ему большое преимущество при юстировках по сравнению с наземными телескопами.

Лучшими калибровочными источниками для юстировки радиотелескопа являются, конечно, точечные источники. Наиболее яркие объекты, видимые с КРТ (Крабовидная туманность, Кассиопея А) разрешаются в диапазоне 1.35 см, а количество доступных точечных объектов невелико из-за невысокой чувствительности КРТ в этом диапазоне [1]. Наибольшее количество юстиро-

вочных наблюдений в диапазоне 1.35 см было проведено по радиогалактике 3С84. Мы столкнулись с двумя сложностями: во-первых, отклики радиометрических выходов от 3С84 в диапазоне 1.35 см зачастую не видны на фоне шумов системы, и, во-вторых, системная температура меняется довольно сильно (амплитуда низкочастотных флуктуаций на порядок выше, чем отклик на источник) в процессе стандартных полуторачасовых юстировочных наблюдений.

Чтобы преодолеть эти трудности и повысить точность юстировки была разработана оригинальная методика, предполагающая следующие этапы обработки данных:

1. К зависимости радиометрического сигнала от времени $S(t)$ применялся медианный фильтр. Параметры фильтра подбирались так, чтобы избавиться от высокочастотных помех (в том числе откликов на источник). Таким образом, получался сглаженный сигнал $M(t)$, описывающий только крупномасштабные изменения системной температуры. Из начального сигнала вычитался сглаженный $S(t) - M(t) = C(t)$. В результате полученный чистый сигнал оказывался свободным от крупномасштабных колебаний системной температуры.

2. Чтобы улучшить соотношение сигнал—шум необходимо было усреднить данные. Для этого мы разбивали данные на отдельные проходы по источнику. При этом мы рассматривали зависимость радиометрического отклика $C(r)$ от расстояния наведения относительно калибровочного источника вдоль прохода. Т.к. источник точечный, то каждый проход $C_i(r)$ представляет собой разрез диаграммы направленности КРТ. В предположении о том, что диаграмма направленности может быть представлена двумерной гауссианой $D(\alpha, \delta)$, мы ожидали, что зависимость отклика на источник от расстояния в каждом проходе можно аппроксимировать гауссианой $D_i(r)$. При этом отдельно рассматривались как проходы в перпендикулярных направлениях (вращение вокруг оси Y и вокруг оси Z), так и проходы в противоположных направлениях вокруг одной и той же оси (по часовой стрелке и против часовой стрелки вокруг оси Y , то же для оси Z). Итого получилось 4 рассматриваемых независимо набора данных, каждый из которых содержал по 4 или 5 (в зависимости от схемы сканирования) проходов по источнику в одном и том же направлении. Амплитуды откликов в разных проходах различны, однако, в предположении гауссовости диаграммы направленности ширина откликов и положение максимумов должно быть одинаковым. Так как целью анализа было определение положения максимумов, то производилось усреднение откликов в каждом наборе данных. На рис. 4а приведены зависимости $S(r)$ без применения фильтрации. Каждая

кривая представляет собой зависимость отклика приемника от расстояния вдоль скана. Всего на рисунке приведено 5 сканов по 2 прохода в каждом. Из-за дрейфа усиления приемника средние значения отклика приемника в каждом проходе разные. На рис. 4б – несколько проходов с фильтрацией $C(r)$, на рис. 4в – усредненный по всем проходам сигнал $A(r)$. По оси абсцисс расстояние от расчетного положения наблюдаемого источника, измеренное вдоль скана (ожидаемый максимум отклика должен находиться в 0).

3. Результирующий усредненный сигнал $A(r)$ аппроксимировался гауссианой. Из параметров гауссианы использовались только ширина на уровне половины максимума и положение максимума. Итого для каждой юстировки было получено по 4 измерения ширины отклика на источник (что соответствует ширине диаграммы направленности при наблюдении точечного источника) и по 4 измерения положения максимума отклика в соответствии со схемой, описанной выше. За ошибки определения этих параметров приняты ошибки подгонки гауссианы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Поправка положения электрической оси КРТ.

Во время юстировочных наблюдений (сканирование площадки $1^\circ \times 1^\circ$) в диапазоне 1.35 см было обнаружено, что координаты максимумов откликов на источник не совпадают с координатами самого источника. Другими словами, существует отклонение между реальной электрической осью КРТ (максимумом диаграммы направленности КРТ) и осью X ВСК. Из-за особенностей диаграммы направленности КРТ в диапазоне 1.35 см [1] достоверно найти отклонение удалось только вдоль оси Y КРТ. При этом отклонение имеет две составляющие: постоянную и переменную, зависящую от направления вращения КА.

Постоянная часть отклонения может быть объяснена, например, деформациями, произошедшими при выведении КА на орбиту и раскрытии КРТ, и составляет величину $2.5'$. Размер диаграммы направленности, измеренной вдоль оси Y , в этом диапазоне составляет $6'$. Таким образом, неучет отклонения оси приводил бы к потере чувствительности КРТ примерно в 2 раза, а чувствительности наземно-космического интерферометра примерно в 1.4 раза.

Переменная часть отклонения равна $1'$ и всегда направлена против вращения КРТ, таким образом, вызывая смещение максимума отклика на источник по направлению движения или, что то же самое, задержку времени прихода максимума по сравнению с расчетным. Переменная часть отклонения может быть частично объяснена за-

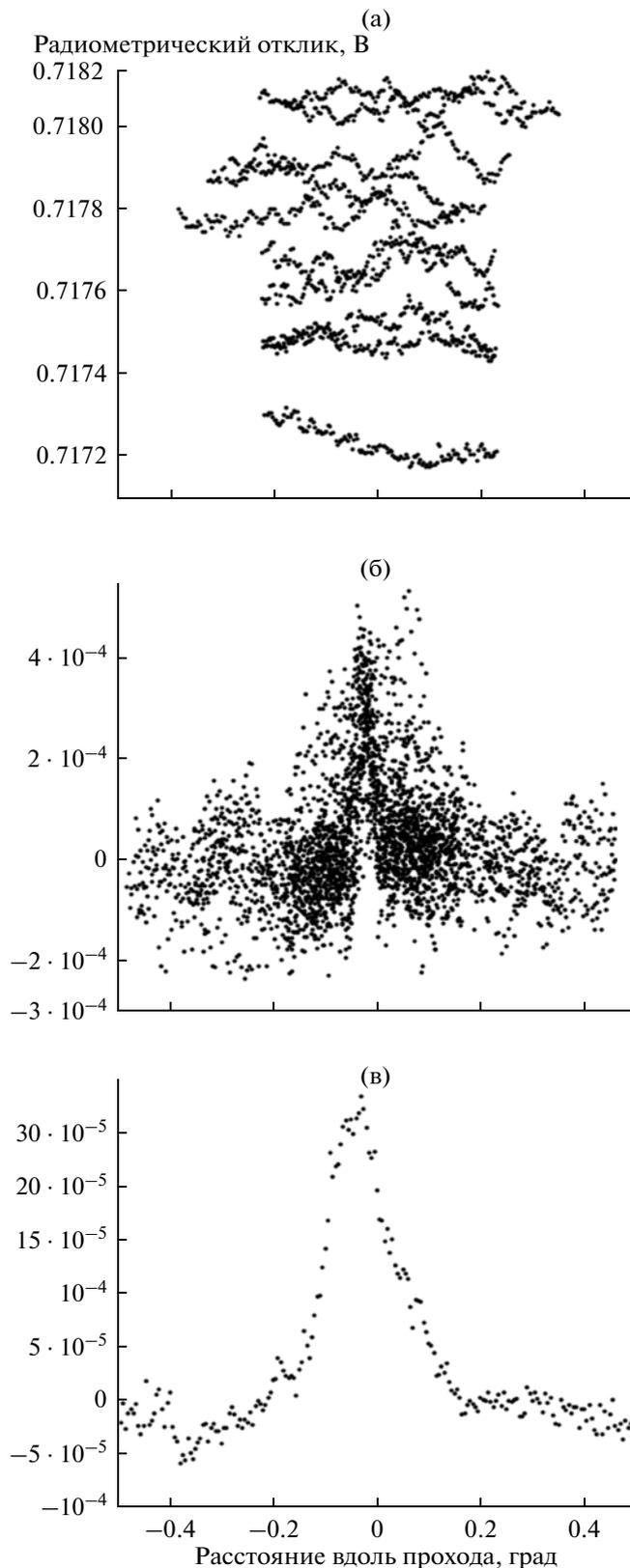


Рис. 4. Радиометрические отклики приемника 1.35 см при движении вокруг оси Z во время юстировки по схеме, приведенной на рис. 2б, на различных этапах фильтрации.

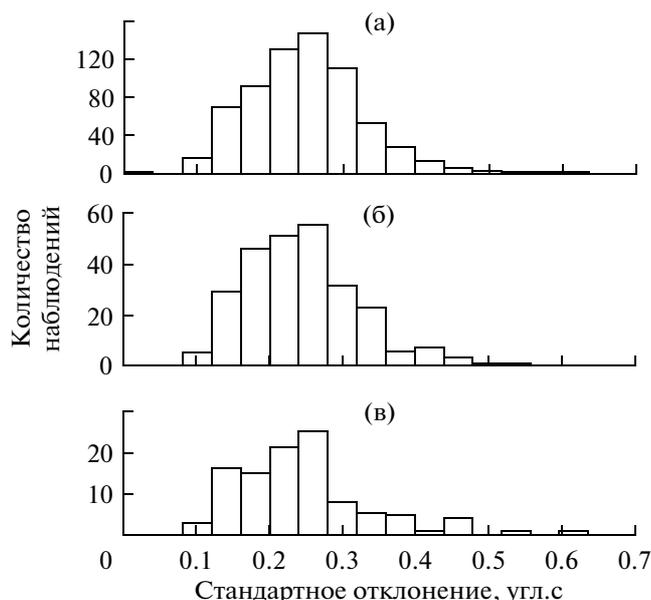


Рис. 5. Распределение точности наведения: а – для всех интерферометрических наблюдений, б – для наблюдений в 2013 г. с использованием 2-х АД; в – для наблюдений в 2013 г. с использованием одного АД.

держкой в интегрирующей цепочке приемника (подробнее см. обсуждение в [1]).

Наличие и стабильность постоянной части отклонения были проверены в юстировках в ноябре 2011–январе 2012. Поправка 2.5' была внесена в стандартное программное обеспечение расчета наведения КРТ 15.XII.2011.

Точность наведения КРТ. В результате обработки данных по наведению КРТ во время интерферометрических сеансов были получены распределения стандартных отклонений (1σ) электрической оси КРТ от направления на источник (с учетом поправки 2.5') по всем наблюдениям до октября 2013 года включительно (около 900 наблюдений). Данное стандартное отклонение характеризует точность наведения КРТ на заданный источник. Гистограммы распределений стандартных отклонений по угловому расстоянию между точкой наведения и источником приведены на рис. 5а. Медианное значение стандартного отклонения расстояния по всем наблюдениям составляет 0.24'', что значительно лучше требований по точности определения ориентации. В большинстве случаев стандартное отклонение не превышает 0.4''.

После 4.1.2013 г. ориентация КРТ в некоторых наблюдениях проводилась только по одному астродатчику. Мы сравнили точности наведения при работе по паре астродатчиков (рис. 5б) и по одному (рис. 5в), используя данные только 2013 года. Точность наведения КРТ при работе по одному астродатчику (медианное значение 0.218'') и по

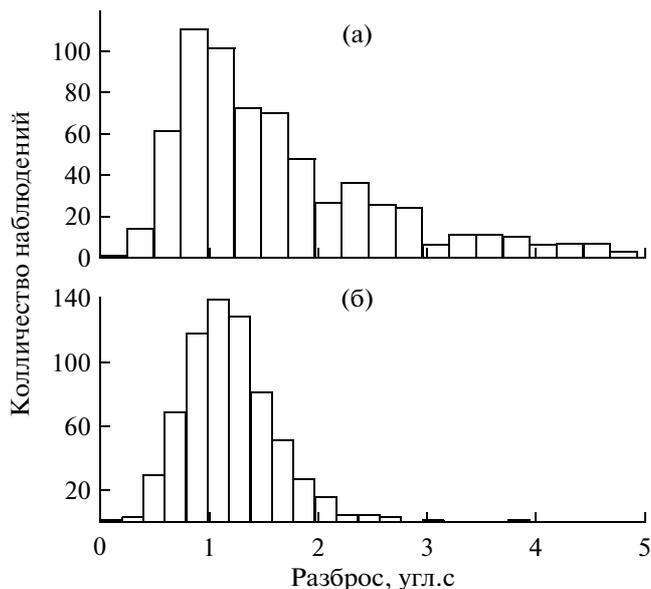


Рис. 6. Распределение разброса точек наведения КРТ во время интерферометрических наблюдений.

паре (медианное значение 0.220'') значимо не отличается.

Кроме того мы сравнили разброс точек наведения с расчетной погрешностью обеспечения ориентации КА. Разброс точек характеризует работу системы стабилизации КА. Медианные значения разброса по прямому восхождению 1.34'' (рис. 6а, отображено 96.6% данных) и склонению 1.13'' (рис. 6б, отображено 99.8% данных) согласуются с расчетным предельным значением 2.3''.

ВЫВОДЫ

1. Наведение КРТ в проекте “РадиоАстрон” обеспечивается с точностью порядка $\sigma = 0.2''$, что полностью удовлетворяет техническим требованиям к проведению научных наблюдений. При этом точность работы системы обеспечения ориентации лучше 1.4'' на временах порядка 1 часа, что согласуется с расчетными предельными значениями.

2. Зависимость точности наведения от количества используемых астродатчиков не обнаружена. Отсутствие ограничения на количество используемых астродатчиков позволяет проводить больше научных сеансов и тем самым повышает эффективность проекта РадиоАстрон.

3. Измерено систематическое отклонение 2.5' между реальной электрической осью КРТ и осью X визирной системы координат. Учет данного эффекта особенно важен при наблюдениях в диапазоне 1.35 см.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-12103. Проект “РадиоАстрон”

осуществляется Астрокосмическим центром ФИАН им. П.Н. Лебедева и НПО им. С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кардашев Н.С. и др.* “Радиоастрон” – телескоп размером 300 000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // *Астроном. ж.* 2003. Т. 90 С. 179–222.
2. *Федорчук С.Д., Архипов М.Ю.* Вопросы обеспечения точности конструкции космического радиотелескопа проекта “Радиоастрон” // *Космич. исслед.* 2014. Т. 52. № 5. С. 415–417.
3. *Войнаков С.М., Филиппова Е.Н., Шейхет А.И., Якимов В.Е.* Функциональные ограничения на ориентацию бортовых и наземных средств в проекте “РадиоАстрон” // *Космич. исслед.* 2014. Т. 52. № 5. С. 408–414.
4. *Аванесов Г.А. и др.* Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС-матрице и коррекция методической ошибки” // *Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции “Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов”*. 2008.