

УДК 629.7

К ВОПРОСУ ОБ АВТОНОМНОМ УТОЧНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗВИВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2021 г. М. Н. Красильщиков¹, Д. М. Кружков¹, *

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*kruzhkovd@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2020 г.

После доработки 19.06.2020 г.

Принята к публикации 17.09.2020 г.

В статье изложены результаты анализа влияния широкого спектра неконтролируемых факторов на точность оценок параметров вращения Земли (ПВЗ), формируемых на борту КА на основе развитой авторами информационной технологии. Предлагаемая информационная технология основана на обработке методом наименьших квадратов (МНК) дальностей до наземных станций, положение которых известно с геодезической точностью. Анализ включает рассмотрение следующих факторов, влияющих на точность и достоверность получаемых оценок: погрешностей измерений упомянутых выше дальностей, ошибок эфемерид КА, ограничений на условия проведения измерений и организацию сеансов связи КА с наземными станциями, условий доступности КА для проведения сеансов измерений, непрогнозируемой эволюции ПВЗ, вариантов используемой в рамках МНК модели динамики компонент вектора ПВЗ. Результаты анализа, полученные путем моделирования процедуры уточнения ПВЗ с использованием предлагаемой технологии, позволили сформулировать качественные и количественные рекомендации по оптимизации on-line экспериментов, реализуемых в перспективе бортовыми алгоритмами КА, выполняющими описанные в технологии процедуры.

DOI: 10.31857/S002342062104004X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время штатное функционирование спутниковых систем различного назначения обеспечивается путем привлечения развитой наземной инфраструктуры. При этом значительная часть ее располагаемых ресурсов используется для формирования так называемого эфемеридно-временного обеспечения, в том числе для загрузки получаемых на земле данных на борт космических аппаратов в условиях принудительного совмещения двух систем координат – Земной связанной системой координат (ITRF), в которой привязаны координаты соответствующих наземных систем, включая комплексы управления, измерительные пункты и прочие объекты инфраструктуры, и Небесной системы координат (GCRS), в которой определяется движение космических аппаратов и формируются их траектории с учетом возмущающих воздействий. Вследствие изменения ориентации плоскостей экватора и эклиптики Земли и ее вращения Земная система координат разворачивается относительно Небесной. Это

движение представляет собой сложный процесс, состоящий из нутации и прецессии Земной оси вращения, суточного вращения Земли с неравномерной угловой скоростью и смещения полюса Земли относительно его некоторого промежуточного положения. На текущий момент все перечисленные процессы строго контролируются целым рядом международных служб, в том числе Международным астрономическим союзом (IAU) и Международной службой вращения Земли (МСВЗ, IERS), привлекающих для этого значительные ресурсы, необходимые для эксплуатации специального комплекса наземных средств (например, системы земных Радиоинтерферометров со сверхдлинной базой) слежения за небесными телами и звездами. На основе их использования МСВЗ регулярно выпускает серии бюллетеней с данными о текущем и прогнозируемом смещении полюса Земли x_p , y_p и значением неравномерности ее суточного вращения ΔUT . Потребителями этих данных являются космические агентства и центры управления полетами, которые либо ис-

пользуют их в своих нуждах при вычислении высокоточных эфемерид спутниковых группировок, либо вынуждены формировать альтернативную громоздкую инфраструктуру, которая позволит осуществлять аналогичные астрометрические измерения с последующей их обработкой и вычислением ПВЗ.

Таким образом, реализация возможности автономного уточнения в режиме реального времени эволюционирующих геодинимических параметров Земли на борту космических аппаратов применительно к эксплуатируемым в настоящее время спутниковым системам представляется перспективным направлением совершенствования потребительских характеристик таких систем с точки зрения повышения автономности их функционирования и снижения затрат на эксплуатацию. При этом критическим моментом в этой проблеме является создание информационной технологии, обеспечивающей возможность уточнения на борту КА изменений параметров вращения Земли (ПВЗ), то есть x_p , y_p и ΔUT в силу неопределенности эволюции именно этих параметров в сравнении с параметрами прецессии и нутации. Авторами данной статьи в сотрудничестве со специалистами АО «Информационные спутниковые системы академика М.Ф. Решетнева» предложена концепция подобной информационной технологии, включающая следующие положения [1]: решение задачи уточнения ПВЗ путем обработки методом наименьших квадратов (МНК) на борту КА накапливаемых измерений дальностей между КА и специальными наземными станциями, положение которых известно с геодезической точностью; формирование в рамках процедуры использования МНК алгоритмов обработки измерений дальности между КА и станциями на основе аналитических выражений в виде частных производных упомянутых дальностей по компонентам вектора ПВЗ; имитационное моделирование процесса уточнения компонент вектора ПВЗ с целью анализа ошибок оценок смещения полюса и неравномерности вращения Земли, полученных в результате обработки измерений дальностей между КА и специальными наземными станциями.

Приведенные в [1] результаты реализации описанной концепции подтвердили потенциальную возможность уточнения ПВЗ на борту КА. В частности, было показано, что предложенный в [1] алгоритм позволяет поддерживать стабильный процесс формирования оценок, эволюционирующих в реальном времени ПВЗ с ошибками не более 10 mas (угловая миллисекунда) по каждому из параметров (при уровне 2 среднеквадратических отклонений (СКО)). При этом в экспериментах на каждом мерном интервале обрабатывалось по 2000 измерений, к которым добавлялись слу-

чайные ошибки. Количество рассматриваемых при моделировании КА – 20, станций – 6.

Необходимым условием успешной реализации данной технологии на борту КА является оптимизация on-line экспериментов, включающих процедуры накопления и обработки измерений в интересах достижения максимальной точности и достоверности формируемых оценок ПВЗ. В рамках решения соответствующей задачи оптимизации эксперимента предполагается использовать комплексный критерий, максимизация которого с учетом существующих технических ограничений определяет цель отработки потенциально возможных циклограмм функционирования бортовых алгоритмов КА при уточнении ПВЗ на их борту. В свою очередь, необходимым условием формализации упомянутого критерия и решением с его использованием подобной задачи оптимизации является предварительный анализ зависимости точности оценок ПВЗ, получаемых на основе предлагаемой технологии, от влияния следующих неконтролируемых факторов различной физической природы: погрешностей, возникающих при проведении измерений между КА и наземными станциями, ошибок эфемерид КА, ограничений на условия проведения измерений, включая ограничения, накладываемые техническими возможностями канала обмена информацией между КА и станциями, условий доступности КА для проведения сеансов, непрогнозируемой эволюции ПВЗ, вариантов используемой в рамках МНК модели уточняемых компонент вектора ПВЗ, вариантов организации сеансов связи КА с наземными станциями.

Таким образом, настоящая статья имеет своей целью создание необходимых условий для решения задачи оптимизации эксперимента по автономному уточнению ПВЗ в интересах достижения наивысшей точности и требуемого уровня достоверности оценок компонент вектора ПВЗ применительно к существующим возможностям использования бортовых средств и свободных ресурсов в рамках современных циклограмм функционирования навигационных КА.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ПРОЦЕССЕ АНАЛИЗА МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗНАЧИМЫХ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ

В настоящем разделе описаны используемые модели перечисленных выше факторов, оказывающих существенное влияние на результаты процесса уточнения ПВЗ на борту КА.

Погрешности, возникающие при проведении измерений дальностей между КА и наземными станциями, обусловлены влиянием ряда физических факторов, таких, как задержка сигнала в аппаратуре, задержка сигнала при его распро-

странении, в том числе в ионосфере и тропосфере, сдвиг бортовых часов приемника сигналов и передатчика относительно системного времени, случайные ошибки (шумы) и т.д. Более подробно все факторы ошибок описаны в [2, 3], а модель измерения дальности между КА и станцией приведена в [4]. В самом общем случае обсуждаемая модель включает набор аддитивных случайных ошибок, статистические характеристики которых известны. Поскольку часть составляющих подобной модели ошибок измерений вариабельна в зависимости от условий их проведения, а другая часть относительно стабильна, было решено представить эту модель в упрощенном виде $\rho_{meas} = \rho + \Delta\rho_{Sys} + \Delta\rho_{Stoh}$, где $\Delta\rho_{Stoh}$ – случайная составляющая ошибки измерения, для которой известно максимальное значение при уровне доверительной вероятности 0.95, $\Delta\rho_{Sys}$ – систематическая составляющая погрешности измерения, т.е. случайная величина, имеющая “дрейф”, скорость которого описывается случайной величиной с известной дисперсией при уровне доверительной вероятности 0.95, ρ – фактическая измеренная дальность [1].

Использование подобной модели позволяет варьировать при проведении экспериментов уровень значений ошибок измерений в интересах анализа их влияния на точность получаемых оценок ПВЗ вплоть до максимального, т.е. в рамках так называемого гарантирующего подхода.

Ошибки эфемерид КА интерпретируются в рамках данной статьи как случайные процессы с характеристиками, варьируемыми в зависимости от уровня детализации модели движения КА в поле действия возмущающих сил с учетом широкого спектра неконтролируемых факторов [5, 6], таких, как аномалии гравитационного потенциала Земли, притяжение третьих тел, давление солнечного света и альбедо и т.д. Известно, что в процессе эксплуатации КА возникают ошибки так называемых опорных (рассчитываемых на борту) эфемерид (координат и компонент вектора скорости), статистические характеристики которых известны лишь приблизительно. Накопленный опыт в этой области на примере исследований расходимости эфемерид ГЛОНАСС [7–9] показывает, в частности, что для КА подобного типа на средних орбитах эволюция ошибок эфемерид может быть описана случайными процессами с заданными статистическими характеристиками. При этом эволюцию погрешностей эфемерид КА удобнее всего представлять в орбитальных осях: радиальном, трансверсальном и бинормальном направлениях:

$$\begin{aligned}\Delta r &= (a_{or} + a_{1r} \cdot T + a_{2r} \cdot T^2) \cdot \sin(\omega_r \cdot T + \phi_r), \\ \Delta n &= (a_{on} + a_{1n} \cdot T + a_{2n} \cdot T^2) \cdot \sin(\omega_n \cdot T + \phi_n), \\ \Delta l &= (a_{ol} + a_{1l} \cdot T + a_{2l} \cdot T^2) + \\ &+ (b_{ol} + b_{1l} \cdot T) \cdot \sin(\omega_l \cdot T + \phi_l),\end{aligned}$$

где a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 – коэффициенты квадратичного тренда, ω и ϕ – гармонические коэффициенты, T – время в днях. Эволюция ошибок в орбитальных осях соответствует зависимостям, представленным на рис. 1.

Ограничения на проведение сеансов измерений обусловлены конкретными инфраструктурными и техническими особенностями эксплуатации спутниковых систем, связанными с необходимостью размещения соответствующих аппаратных и программных средств как на борту КА, так и на Земле, а также существованием соответствующих циклограмм эксплуатации обсуждаемых алгоритмов. Таким образом, исследование влияния данного фактора на результаты уточнения ПВЗ предполагает анализ характеристик точности оценок ПВЗ в условиях вариабельности частоты проведения измерений, общего количества измерений на интервале, допустимой частоты повторения сеансов измерений, длительности сеансов, количества участвующих КА, количества используемых станций, факта допустимости обмена данными между КА и пропускной способности этого канала.

Непрогнозируемая эволюция смещения полюсов и, главным образом, неравномерности вращения Земли ΔUT вызвана физической природой их изменения, которая не до конца изучена [4, 10, 11]. Как следствие, изменение реальных значений ПВЗ может резко отличаться от предполагаемых ранее их значений, полученных путем прогноза эволюции ПВЗ с помощью краткосрочного линейного или долгосрочного полиномиального трендов. Для учета данного фактора в эксперименте недостаточно использовать модель, основанную только на загрузке апостериорных данных эволюции ПВЗ, доступных для прошедших интервалов времени (речь о применении в экспериментах бюллетеней С04 [12] для моделирования реальных значений ПВЗ). Причиной этому является тот факт, что в будущем не гарантировано аналогичного характера эволюции ПВЗ, в отличие от относительно стабильной упомянутой выше модели расходимости ошибок эфемерид КА, тренд которой в целом неизменен.

Альтернативным подходом к формированию модели эволюции ПВЗ было бы использование гистограммы суточной эволюции ПВЗ на длительном отрезке времени, что, в конечном счете, приводит к вероятностному и гарантирующему подходам при моделировании эволюции ПВЗ в экспериментах на будущих периодах (см. рис. 2).

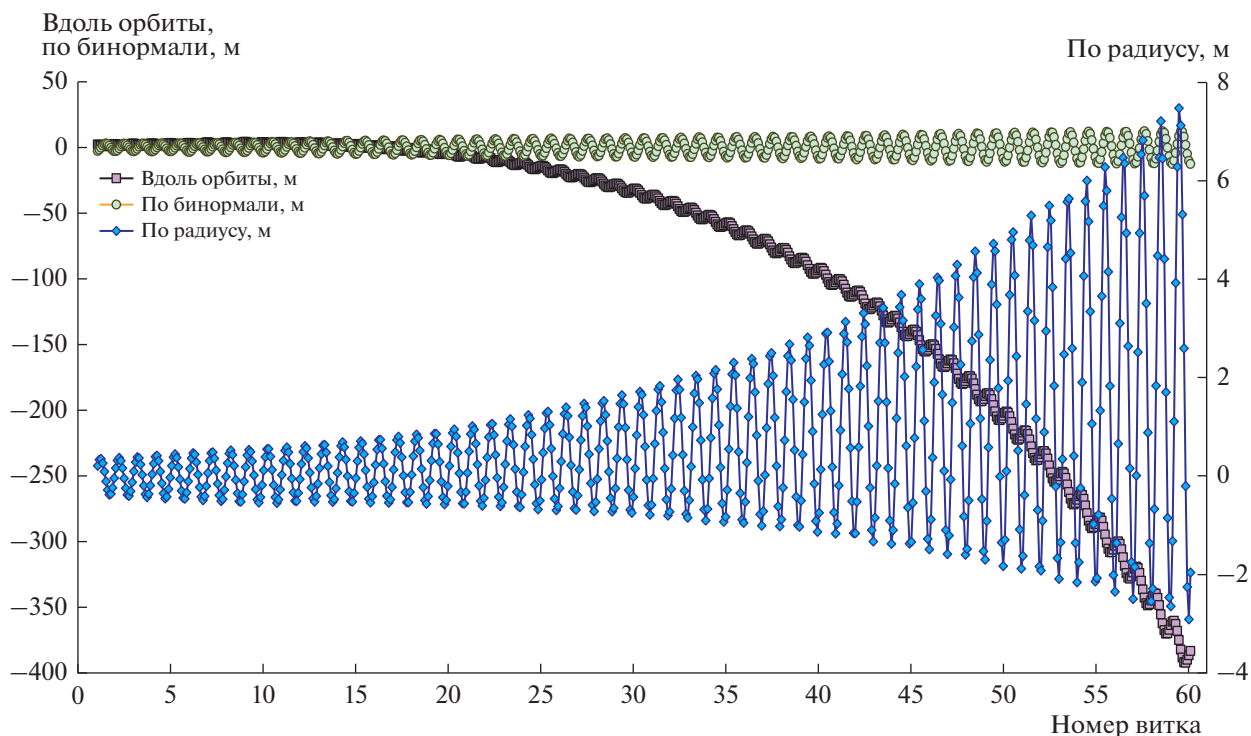


Рис. 1. Эволюция ошибок эфемерид КА.

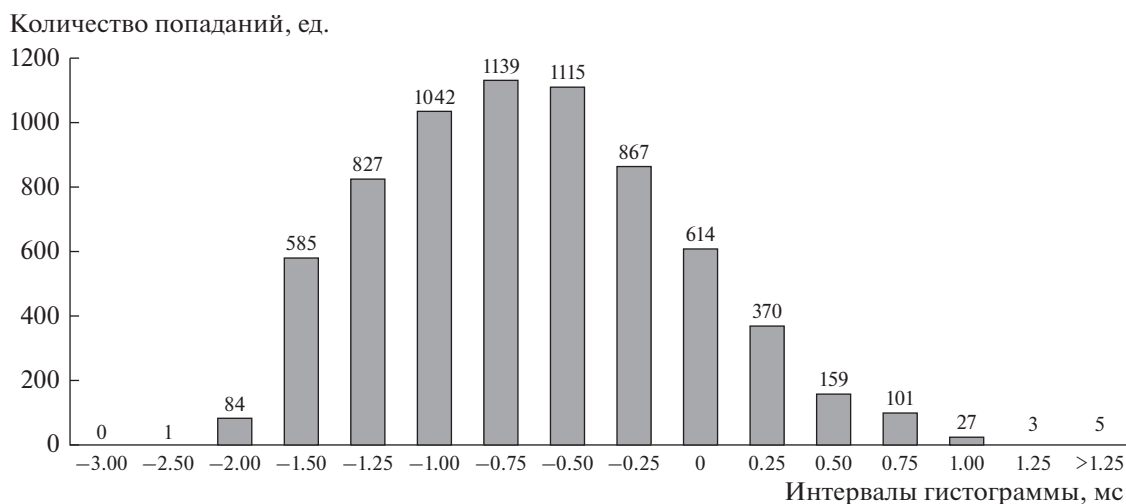


Рис. 2. Гистограмма суточных изменений ΔUT за 10 лет эволюции.

При этом изменения ПВЗ реализуются в форме аддитивных добавок к текущим их суточным значениям.

В рамках данной статьи для анализа влияния непрогнозируемой эволюции ПВЗ развиваемая авторами технология анализируется с использованием как вероятностного, так и гарантирующего подходов.

Вид уточняемой на борту модели ПВЗ представлен несколькими вариантами, отличающимися степенью полинома, описывающего их эволюцию. Самый простой способ – уточнение ПВЗ как констант, имеет недостаток, связанный с уходом фактических значений оцениваемых параметров в течение процесса накопления измерений. Представление ПВЗ в виде линейных трен-

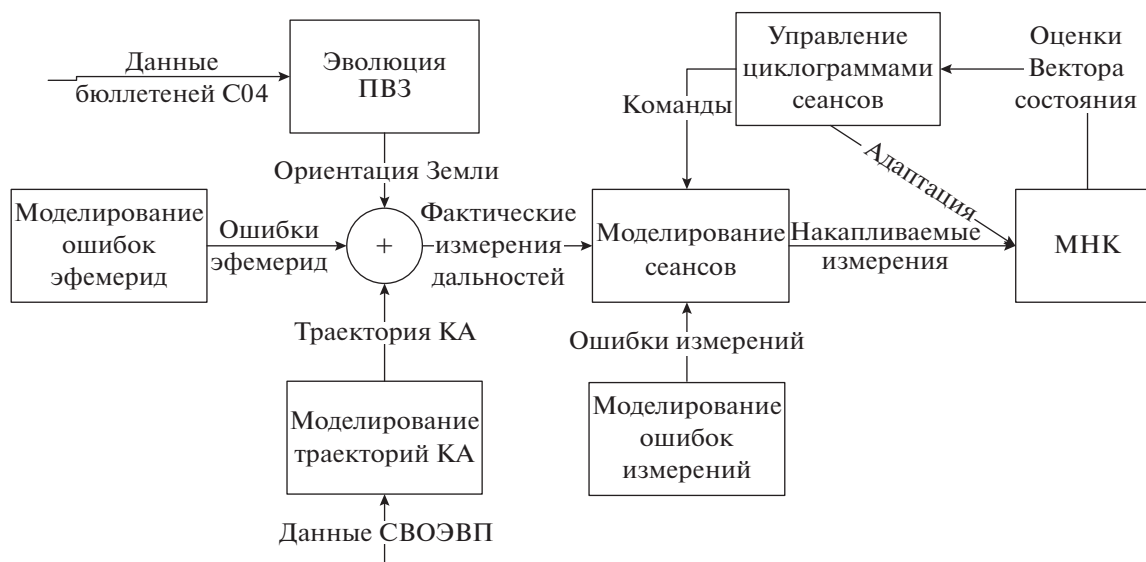


Рис. 3. Функциональная схема моделирования с использованием программного обеспечения.

дов осложнено последующей их оценкой в связи с наличием шумов измерений в условиях оценивания величин разных порядков (постоянной части ПВЗ и суточной производной их изменения). Представление ПВЗ в виде полиномов 2-ой степени усложняет процесс оценивания в силу наличия большого числа компонент вектора состояния, для оценки которых необходимо получение соответствующих условий наблюдаемости [13]. Иными словами, представляется необходимым использовать для анализа все перечисленные выше варианты модели уточняемых ПВЗ.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния перечисленных факторов на процесс уточнения ПВЗ авторами было доработано программное обеспечение [1, 14], которое, в конечном итоге, включало компоненты, обеспечивающие моделирование:

ретроспективной реальной траектории КА на основе доступных высокоточных эфемерид [15, http://www.glonass-svoevp.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=259&lang=ru];

прогнозируемых траекторий движения КА с использованием специализированного программного блока [6];

ретроспективной эволюции ПВЗ на основе реальных данных из бюллетеней С04;

будущей эволюции ПВЗ на основе трендов с добавлением максимального уровня изменения и учетом статистики (рис. 2);

вращения Земли с учетом прецессии и нутации земного экватора на основе использования соотношений, рекомендованных IERS [10];

погрешностей проведенных измерений и погрешностей прогнозирования эфемерид КА на борту согласно описанным выше моделям.

Кроме того, упомянутое ПО включило блоки, необходимые для проведения обработки измерений с использованием МНК в соответствии с описанными в [1] соотношениями алгоритмов on-line уточнения ПВЗ, включая аналитические частные производные измерений дальностей по ПВЗ, а также блоки, обеспечивающие контроль результатов выполнения этих процедур на предмет расходимости получаемых оценок.

3. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве исходных данных для экспериментов рассматривались:

интервал даты времени по шкале UTC с 2009 по 2019 г.;

количество КА в группировке от 1 до 20 (орбиты круговые, с наклоном 64.8 град и высотой ~19 400 км);

количество станций от 1 до 6 в произвольно выбранных точках, в том числе на территории РФ.

Общая функциональная схема проводимых экспериментов приведена на рис. 3.

На рис. 3 показано, что основным является блок управления сеансами накопления измерений КА-станция, который также производит прогнозирование сеансов, управление алгоритмами обработки измерений, в том числе составом

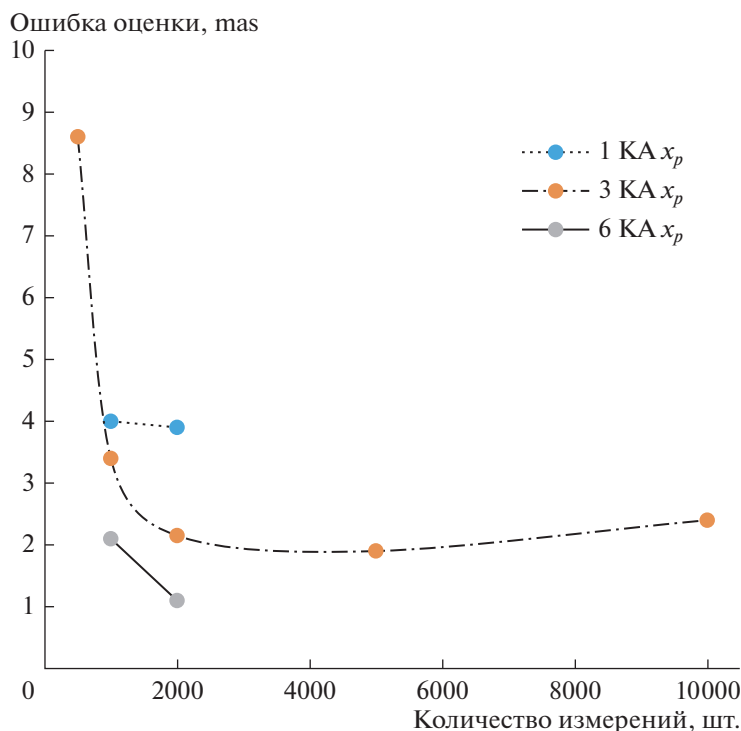


Рис. 4. Ошибка оценки x_p (mas) по уровню вероятности 0.95 в зависимости от количества КА и числа накапливаемых измерений.

вектора состояния, размером выборки и интервалом накопления.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Влияние особенностей проведения сеансов измерений

Результаты исследования влияния условий проведения экспериментов по накоплению и обработке измерений дальностей между КА и наземными станциями на конечную точность получаемых оценок приведены на рис. 4–7. Конкретно, на рис. 4 и 5 приведено несколько кривых, соответствующих использованию в экспериментах разного числа КА — одного, трех и шести. Зависимости показывают получаемые ошибки оценок ПВЗ, выраженные в мас, при уровне доверительной вероятности 0.95 и различном количестве обрабатываемых измерений.

На основе результатов экспериментов, приведенных на рис. 4, 5, можно сделать следующие выводы. Точность результатов обработки зависит от количества измерений нелинейно, что связано с фактом влияния эволюции ПВЗ на методическую ошибку оценки ПВЗ их в МНК как констант, и в дальнейшем приводит к росту ошибок оценок. Иными словами, увеличение числа КА, которое позволяет кратко повысить точность

оценок (см. рис. выше), приводит лишь к ускорению накопления выборки измерений нужного размера, так как, в конечном счете, количество обработанных в единицу времени (интервал — сутки) измерений при прочих равных условиях определяет точность оценок.

Таким образом, представленные зависимости и результаты их анализа позволяют определить необходимое количество измерений, подлежащее обработке в течение суток, исходя из требований к точности получаемых оценок ПВЗ и количестве располагаемых для проведения сеансов КА.

Влияние ошибок измерений. При прочих равных условиях величина среднеквадратического отклонения (СКО) случайных ошибок измерений в первом приближении линейно влияет на СКО ошибок оценок ПВЗ (см. рис. 6).

На рис. 6 приведены зависимости, характеризующие СКО ошибок оценок ПВЗ, где x_p , y_p — обозначения ошибок оценок смещения полюса, а ΔUT — ошибка оценки неравномерности вращения Земли. Индексы 1 и 2 в обозначениях представленных зависимостей указывают на количество накапливаемых в эксперименте измерений для обработки МНК на одном мерном интервале, 1 — соответствует варианту использования 1000 измерений, 2 — соответственно 2000. Наибольший эффект увеличения количества измерений до 2000 достигается в отношении погрешностей определе-

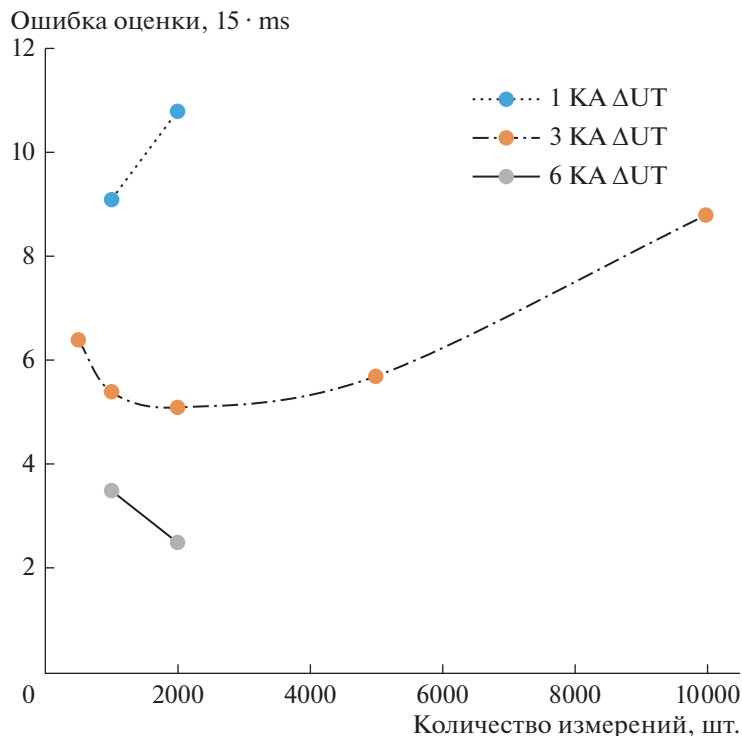


Рис. 5. Ошибка оценки ΔUT ($15 \cdot ms$) по уровню вероятности 0.95 в зависимости от количества КА и числа накапливаемых измерений.

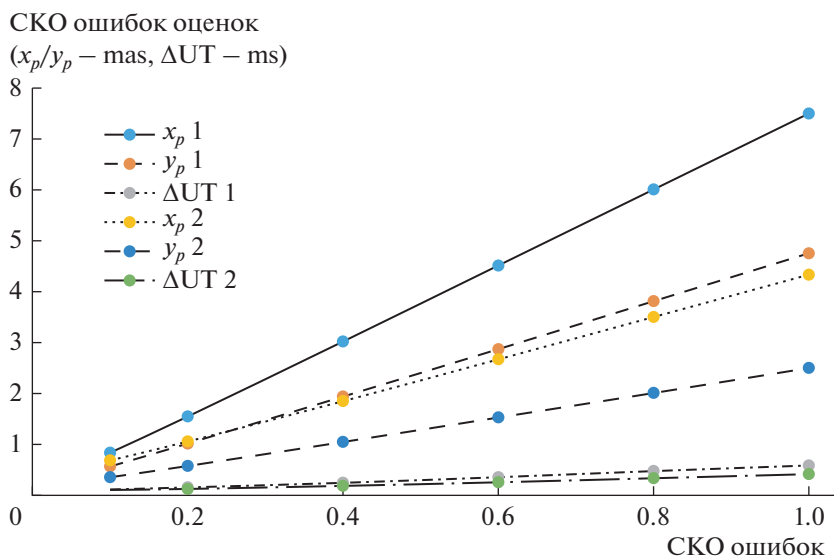


Рис. 6. СКО ошибок оценок ПВЗ ($x_p, y_p - mas, \Delta UT - ms$) в зависимости от СКО случайных ошибок измерений.

ния полюса в силу относительной стабильности эволюции x_p, y_p , тогда как неравномерность вращения земли оценивается хуже даже при большем количестве измерений в силу объективно существующей неопределенности ее эволюции.

Наличие неуточняемых систематических ошибок измерений, приводящих к “дрейфу” систематических ошибок, ведет, как и следовало ожидать, к расходимости МНК. При включении данных погрешностей в качестве согласующих параметров в

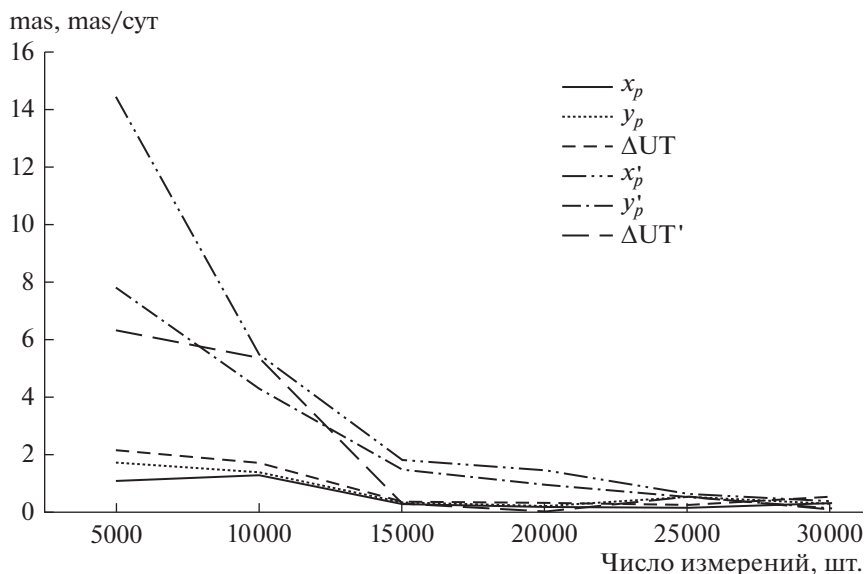


Рис. 7. Ошибки оценки 0-вых компонент ПВЗ в mas и производных эволюции ПВЗ mas/сут.

состав оцениваемых компонент вектора состояния наряду с ПВЗ, МНК работает устойчиво.

Оценка параметров тренда эволюции ПВЗ

Попытка оценить коэффициенты линейного или квадратичного полиномов, описывающих эволюцию ПВЗ, показала, что решение этой задачи требует большего числа измерений. В частности, для оценки коэффициента линейного тренда, описывающего временную зависимость изменения ПВЗ, результат расчета зависимости получаемой точности оценок от количества измерений выглядит следующим образом (рис. 7).

На рис. 7 приведены зависимости, характеризующие ошибки оценок коэффициентов линейных трендов, описывающих эволюцию ПВЗ, как функции числа обработанных измерений, а именно: начальные значения и производные суточного изменения. Заметно, что для уточнения параметров даже линейного полинома требуется на порядок большее число измерений (не 500–1000, как было показано выше, а более 5000), что может привести к сложности технической реализации такой процедуры в силу ограничений на количество станций, количество КА и зоны взаимной видимости. Использование для оценки ПВЗ коэффициентов квадратичных зависимостей практически не реализуемо, так как требует еще большего, чем показанного на рис. 7, количества измерений. Подобные интервалы накопления измерений (до 10000) могут требовать нескольких суток работы КА и станции в рамках одной циклограммы уточнения, что влечет за собой потенциальное расхождение модели эволюции любого из параметров ПВЗ в отличную от используемого в алго-

ритмах обработки априорного предположения о его тренде сторону. Таким образом, в первом приближении целесообразно рассматривать при оценке ПВЗ их значения как константы, а интервалы накопления измерений и частоту повторения сеансов подобрать предлагаемым в данной статье образом. В таком случае погрешностью, вызванной уходом ПВЗ за период “устаревания” измерений, можно пренебречь.

Влияние ошибок эфемерид

Ошибки эфемерид КА в инерциальной СК (координаты станций известны в Земной СК с очень высокой точностью) оказывают наибольшее влияние на сходимость МНК и точность формируемых оценок ПВЗ. При этом, даже незначительный тренд роста ошибок (0.001 м в СКО ошибок в сутки для составляющих координат КА) при условии накопления 2000 измерений приводит к получению неадекватных реальной эволюции оценок ПВЗ. Компенсировать данный фактор возможно путем включения составляющих (главным образом радиальной) погрешностей эфемерид КА в оцениваемый МНК вектор состояния. При этом включать их в оцениваемый вектор как константы можно лишь в условиях, когда ошибки эфемерид постоянны, даже если их значения велики (до 100 м). Если же наблюдается динамика этих ошибок, и коэффициент тренда, описывающего эту динамику, неизвестен, то, как показало моделирование, в качестве оцениваемых компонент вектора состояния и в число соответствующих элементов матрицы частных производных нужно включать для каждого КА неизвестные параметры тренда: начальное значение

и коэффициент роста. При этом алгоритм МНК демонстрирует сходимость и формирует адекватные оценки ПВЗ. Эксперименты подтвердили, что максимально быстрое накопление измерений на коротких интервалах способствуют существенному (на порядок) улучшению точности оценок ПВЗ.

В частности, если рост СКО ошибок эфемерид составляет 1 см в сутки, имеют место следующие характеристики точности оценок ПВЗ:

при наличии в МНК описанных выше процедур адаптации к ошибкам эфемерид и накоплении 1000 измерений ошибки оценок ПВЗ по уровню вероятности 0.95 не превышают 15 mas;

в ситуации, когда принятый коэффициент роста ожидаемого тренда ошибок эфемерид меньше их реального значения (например, в 2 раза), ошибки оценок ПВЗ возрастают до 36 и более mas;

при отсутствии механизма адаптации элементов матрицы ЧП по отношению к тренду ошибок эфемерид не удается достичь устойчивого решения МНК, обладающего сходимостью; при этом ошибки оценок ПВЗ достигают 200 и более mas при уровне доверительной вероятности 0.95, что неприемлемо для использования в прикладных целях.

В подобной ситуации выход состоит в привлечении межспутниковых измерений и их интеграции в рамках процедур развиваемой информационной технологии. Так как на основе обработки межспутниковых измерений возможно уточнение эфемерид КА в инерциальном пространстве, то такая интеграция измерений, в конечном итоге, положительно скажется на точности получаемых оценок ПВЗ. Какие результаты это позволит получить — будет понятно при проведении отдельного исследования, не являющегося предметом настоящей статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты анализа влияния широкого спектра неконтролируемых факторов на точность оценок ПВЗ, формируемых на борту КА на основе предлагаемой информационной технологии.

На основе имитационного моделирования процесса уточнения ПВЗ показано следующее:

рост СКО случайных ошибок измерений приводит к пропорциональному росту ошибок оценок ПВЗ; при этом коэффициент пропорциональности определяется количеством обрабатываемых измерений;

систематические ошибки измерений необходимо включать в число компонент оцениваемого вектора в качестве согласующих параметров с целью исключения их влияния на точность оценок ПВЗ;

наиболее целесообразной моделью динамики ПВЗ с точки зрения критерия “точность/производительность алгоритма” является представление компонент этого вектора как констант;

организация on-line экспериментов должна обеспечивать максимально быстрое накопление числа измерений, гарантирующих получение адекватных реальной динамике оценок ПВЗ;

для устранения негативного влияния ошибок эфемерид необходимо использовать механизм адаптации МНК к коэффициенту тренда ошибок эфемерид.

Сформулированные выше выводы и рекомендации являются основой для формирования комплексного критерия и процедуры оптимизации on-line эксперимента применительно к реализации перспективного бортового алгоритма КА автономного уточнения ПВЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гречкосеев А.К., Красильщиков М.Н., Кружков Д.М. и др.* Уточнение параметров вращения земли на борту космических аппаратов. Концепция и информационная технология // Изв. РАН: Теория и системы управления. 2020. № 4. С. 125–135.
2. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсно-контрольный документ (редакция 5.1). М.: РНИИ КП, 2008.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. Красильщикова М.Н., Себрякова Г.Г. М.: Физматлит, 2009.
4. *Бартевев В.А., Гречкосеев А.К., Козорез Д.А. и др.* Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации. М.: Физматлит, 2014.
5. *Vallado D.* Fundamentals of Astrodynamics and Applications. NY: Springer, 2007.
6. *Kozorez D.A., Krasilshchikov M.N., Kruzchkov D.M. et al.* Integrated navigation system for a space vehicle on a geostationary or highly elliptic orbit operating in the presence of active jam // J. Computer and Systems Sciences International. 2013. V. 52. № 3. P. 468–469.
7. *Гречкосеев А.К.* Технологии повышения точности определения орбит космических аппаратов с использованием межспутниковых измерений в условиях автономного функционирования. Дис. докт. наук. М.: МАИ, 2011.
8. *Василенко А.В., Гречкосеев А.К., Муратов Д.С. и др.* Алгоритм расчета собственных эфемерид на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС с использованием взаимных псевдодальномерных измерений между ними // Научные технологии. 2014. Т. 15. № 9. С. 43–50.
9. *Grechkoseev A.K.* Study of observability of motion of an orbital group of navigation space system using intersat-

- ellite range measurements. I // J. Computer and Systems Sciences International. 2011. V. 50. № 2. P. 293–308.
10. IERS Technical Note 36. IERS Conventions (2010). URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html?nn=94912> (дата обращения: 14.05.2019).
 11. Жуков А.Н., Зотов С.М., Коробкин В.А. и др. Решение проблемы точности системы ГЛОНАСС и перспективы ее улучшения в ближайшие годы // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 35. С. 17–23.
 12. Bizouard C., Lambert S., Gattano C. et al. Combined solution C04 for Earth Rotation Parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame 2014 // J. Geodesy. 2019. № 93. P. 621–633.
 13. Лебедев А.А., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1985.
 14. Akimov E.V., Kruzhhkov D.M., Yakimenko V.A. Prototype information system for high-precision navigation in global satellite systems // Russian Engineering research. 2020. V. 40. № 2. P. 156–159.
 15. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемеридно-временных поправок. Интерфейсно-контрольный документ (редакция 3.0). М., 2010.