
НАВИГАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 629.7

**УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ НА БОРТУ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.
КОНЦЕПЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

© 2020 г. А. К. Гречкосеев^b, М. Н. Красильщиков^a,
Д. М. Кружков^{a,*}, Т. А. Марарескул^b

^a МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

^b Акционерное общество “Информационные спутниковые системы”
имени академика М.Ф. Решетнёва”, Железногорск, Россия

*e-mail: kruzchkovd@mail.ru

Поступила в редакцию 04.02.2020 г.

После доработки 18.02.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2020 г.

Рассматривается задача уточнения эволюционирующих параметров вращения Земли, используемых при переходе из инерциальной в земную систему координат, в том числе при расчете эфемерид на борту навигационных космических аппаратов. Обсуждаются подходы и технологии, применяемые для уточнения упомянутых параметров в настоящее время. Предложена концепция уточнения параметров вращения Земли с помощью наземных станций и космических аппаратов, основанная на обработке методом наименьших квадратов измерений дальностей между космическим аппаратом и наземной станцией. Приводятся математические модели, алгоритмы уточнения и результаты их отработки в проведенных имитационных экспериментах по моделированию процессов уточнения параметров вращения Земли на борту космических аппаратов.

DOI: 10.31857/S000233882004006X

Введение. В настоящее время на рынке космических услуг наибольшую актуальность приобретают различные информационные сервисы, предоставляемые потребителю. Иными словами, чтобы обеспечить лидирующие позиции в этом секторе, необходимо не только постоянно расширять спектр предлагаемых услуг, включая связь, навигацию, мониторинг и пр., но и постоянно повышать качество предоставляемых сервисов до уровня, превышающего общемировой. Одной из критических технологий, являющейся ключевым фактором в достижении наилучшего качества сервисов потребителя, является технология повышения точности и повышения независимости от наземного сегмента функционирования космических группировок информационных спутниковых систем. Современные спутниковые системы многих стран обладают достаточно высоким уровнем достигнутых возможностей в части реализации данной технологии. Однако по-прежнему остается значительный пробел, связанный с влиянием неопределенностей в знании геодинимических параметров Земли на длительных интервалах прогнозирования, которые не позволяют обеспечить наилучшее, при прочих равных условиях качество эфемеридно-временного обеспечения космических аппаратов (КА). Неопределенность значений упомянутых выше параметров заставляет соответствующие службы привлекать значительные ресурсы для трудоемких вычислений на основании внешней информации с последующим сопровождением полученных результатов. Очевидно, что неоспоримое конкурентное преимущество получит тот, кто реализует цепочку уточнения геодинимических параметров Земли на борту КА на длительных интервалах времени по доступным на борту измерениям.

Речь идет об уточнении текущих значений смещения мгновенного полюса Земли и неравномерности ее вращения, представляющей собой разницу между земным временем UT1 (universal time, всемирное время) и используемой в различных приложениях координированной шкалой UTC (universal time coordinated, всемирное координированное время). Уточнение всех перечисленных параметров позволяет устранить существенную неопределенность в расчетах движения

КА и, как следствие, повысить качество информации, которую получает потребитель от различных целевых устройств аппаратуры КА информационных спутниковых систем.

Таким образом, в статье рассматривается постановка задачи уточнения на длительном интервале времени параметров вращения Земли (ПВЗ), основанная на возможности на борту КА проводить взаимные измерения дальности между КА и наземной станцией, а также накапливать данные измерения для повышения точности пересчета эфемерид в земную систему координат.

Задача уточнения эфемерид на борту актуальна для таких навигационных систем, как ГЛОНАСС [1, 2], GPS, Beidou [3].

Задачу уточнения эфемерид на борту КА в более общей форме необходимо решать совместно с уточнением ПВЗ, например по межспутниковым измерениям и измерениям дальности между КА и наземными станциями. Однако в настоящей статье задача уточнения ПВЗ по измерениям дальности между КА и наземными станциями (межспутниковые измерения бесполезны для уточнения ПВЗ) рассматривается как самостоятельная с целью изучения свойств информационной технологии и предварительной оценки целесообразности уточнения ПВЗ на борту КА.

1. Эволюция ПВЗ, методы прогнозирования, существующие подходы. Остановимся более подробно на эволюции ПВЗ и проблеме их прогнозирования, существование которой в настоящий момент накладывает ряд ограничений на эксплуатацию космических группировок различного назначения. Как известно, смещение полюса и неравномерность вращения Земли вызвана действием различных факторов, среди которых основными являются внутренние процессы в теле Земли, а также гравитационное влияние небесных тел. В результате длительного наблюдения за динамикой упомянутых процессов в настоящий момент разработан ряд моделей [4–6], позволяющих частично описать эволюцию ПВЗ на основе детерминированных выражений, представляющих собой суммы линейного тренда и тригонометрических функций. Тем не менее, точность такого описания, как и точность прогнозирования ПВЗ с использованием существующих моделей и на основе обработки накопленных с применением радиоинтерферометров со сверхдлинной базой и лазерной локации реальных данных, до сих пор остается невелика. Анализ ряда работ [7–9], посвященных исследованию процессов прогнозирования и описания эволюции ПВЗ, а также собственные оценки авторов статьи показывают, что в настоящее время наилучшие характеристики точности прогноза на месяц и более длительные интервалы времени для смещения полюса на уровне двух среднеквадратических отклонений (СКО) составляют десятки mas (milliarcseconds, угловые миллисекунды) и для неравномерности вращения Земли на том же уровне точности составляют десятки ms (milliseconds, миллисекунд) разницы между UT1 и UTC.

Очевидно, что подобная точность расчета ПВЗ не может быть достаточной для расчета эфемерид КА, поскольку последние в таком случае при переходе из инерциальной системы координат через общепринятые соотношения [6] в земную систему координат будут содержать значительные (десятки метров) погрешности. Таким образом, применительно к задаче повышения независимости от наземного сегмента при функционировании спутниковых группировок бортовая модель прогноза ПВЗ не может быть использована при расчете на борту КА эфемерид непосредственно без ущерба их точностных характеристик и связанных с ними потребительских свойств.

2. Концепция, методы и алгоритмы уточнения ПВЗ с использованием КА. Анализ описанной выше ситуации с прогнозированием ПВЗ приводит к необходимости разработки концепции оценки таких параметров на борту в процессе эксплуатации КА. Сделать это без привлечения каких-либо технических средств, размещаемых на поверхности Земли, в силу физической природы эволюции ПВЗ, невозможно. Таким образом, обязательным условием мониторинга каких-либо даже косвенных факторов изменения ПВЗ является размещение на поверхности Земли реализующих измерения аппаратных средств (станций), позволяющих выявить связь между ПВЗ и координатами КА. Такая связь обеспечивает путем специальной обработки измерения между КА и наземными станциями формирование оценок ПВЗ либо поправок к их прогнозным значениям. Для того, чтобы обсудить приемлемый вариант реализации такой технологии, рассмотрим матрицу перехода между земной промежуточной системой координат (ЗПСК), ориентация которой относительно инерциальной Geocentric celestial reference system (GCRS) на эпоху J2000 [6] определяется соотношениями учета прецессии, нутации земной оси и эволюции звездного времени,

и Земной связанной системой координат (ЗССК), ориентация которой определяется текущим положением полюса и неравномерностью вращения Земли:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{ITRF}^{TIRS} &= (\mathbf{A}_X^T(y_p)) \times (\mathbf{A}_Y^T(x_p)) \times (\mathbf{A}_Z^T(\Delta UT)) = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos y_p & -\sin y_p \\ 0 & \sin y_p & \cos y_p \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos x_p & 0 & \sin x_p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin x_p & 0 & \cos x_p \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \Delta UT & -\sin \Delta UT & 0 \\ \sin \Delta UT & \cos \Delta UT & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos x_p \cos \Delta UT & \cos(x_p) \sin \Delta UT & \sin x_p \\ \sin y_p \sin x_p \cos \Delta UT - \cos y_p \sin \Delta UT & \sin y_p \sin x_p \sin \Delta UT + \cos y_p \cos \Delta UT & -\sin y_p \cos x_p \\ -\cos y_p \sin x_p \cos \Delta UT - \sin y_p \sin \Delta UT & -\cos y_p \sin x_p \sin \Delta UT + \sin y_p \cos \Delta UT & \cos y_p \cos x_p \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где x_p, y_p – смещение полюса, $\Delta UT = UT1 - UTC$ – неравномерность вращения Земли, выраженная в угловой мере разворота ЗССК относительно ЗПСК (1 ms ΔUT соответствует 15 mas).

Согласно эволюции элементов данной матрицы, при изменении ПВЗ меняется представление вектора состояния КА в ЗССК при том, что координаты станции, неподвижной на поверхности Земли, фиксированы, что приводит к изменению взаимного расположения станций и КА. Следовательно, путем обработки сигналов, которые могут быть приняты на борту КА от таких станций и интерпретированы как измерения дальности между КА и станцией, можно провести оценку изменения компонент данной матрицы.

Формализуем выражение для дальности между станцией и КА:

$$\rho = f(\mathbf{X}_{ст}^i{}^{ЗССК}(t_l), \mathbf{X}_{КА}^j{}^{GCRS}(t_k)), \quad (2.1)$$

где $\mathbf{X}_{КА}^j{}^{GCRS}(t_k)$ – координаты j -го КА в инерциальной системе координат (СК) GCRS в момент t_k получения сигнала от наземной станции, $\mathbf{X}_{ст}^i{}^{ЗССК}(t_l)$ – координаты i -й наземной станции в ЗССК в момент t_l отправки сигнала.

Очевидно, что использование выражения (2.1) в алгоритмах обработки измерений требует представления векторов положения наземной станции и КА в одной системе координат. Запишем вектор (2.1) в ЗССК. В таком случае выражение для вычисления геометрической дальности “КА-станция” запишем как:

$$\rho = f(\mathbf{X}_{ст}^i(t_l), \mathbf{A}^T(x_p(t_s), y_p(t_s), \Delta UT(t_s)) \mathbf{X}_{КА}^j(t_k)). \quad (2.2)$$

В соотношении (2.2) момент времени t_s можно принять равным t_k или t_l . Правильным выбором будет применение в качестве момента времени t_s приема сигнала и генерирования измерения. Если учесть тот факт, что прием сигнала станции производится на борту КА, то в качестве вектора координат станции нужно использовать $\mathbf{X}_{ст}^i(t_l)$ в ЗССК, а вектор координат КА преобразовать в земную СК и воспользоваться выражением (2.2), в котором t_s будет соответствовать моменту приема сигнала на борту.

Преобразуем (2.2) до компонент, включающих, в том числе, непосредственно компоненты вектора ПВЗ. Конкретизируем состав компонент векторов $\mathbf{X}_{ст}^i(t_l) = (x_s^i(t_l) \ y_s^i(t_l) \ z_s^i(t_l))$ и $\mathbf{X}_{КА}^j(t_k) = (x_g^j(t_k) \ y_g^j(t_k) \ z_g^j(t_k))$ и упростим их в преобразованиях: $\mathbf{X}_{ст}^i(t_l) = (X_s \ Y_s \ Z_s)$ и $\mathbf{X}_{КА}^j(t_l) = (X_g \ Y_g \ Z_g)$. Тогда выражение для дальности между КА и станцией примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \rho_3^2}, \\ \rho_1 &= Y_s - X_g (\cos y_p(t_s) \sin \Delta UT(t_s) + \cos \Delta UT(t_s) \sin x_p(t_s) \sin y_p(t_s)) - \\ &- Y_g (\cos \Delta UT(t_s) \cos y_p(t_s) - \sin \Delta UT(t_s) \sin x_p(t_s) \sin y_p(t_s)) + Z_g \cos x_p(t_s) \sin y_p(t_s), \\ \rho_2 &= X_g (\sin \Delta UT(t_s) \sin y_p(t_s) - \cos \Delta UT(t_s) \cos y_p(t_s) \sin x_p(t_s)) - \\ &- Z_s + Y_g (\cos \Delta UT(t_s) \sin y_p(t_s) + \cos y_p(t_s) \sin \Delta UT(t_s) \sin x_p(t_s)) + Z_g \cos x_p(t_s) \cos y_p(t_s), \\ \rho_3 &= X_s - Z_g \sin x_p(t_s) - X_g \cos \Delta UT(t_s) \cos y_p(t_s) + Y_g \cos x_p(t_s) \sin \Delta UT(t_s). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Если принять во внимание малость углов поворота земной связанной системы координат вследствие смещения полюсов и неравномерности вращения Земли, то все косинусы из соотно-

шения выше можно заменить единицами, а синусы – углами. При этом произведения синусов ввиду двойного или тройного порядка их малости можно не учитывать. Таким образом, итоговое выражение преобразуется следующим образом:

$$\rho = \sqrt{(Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p)^2 + (-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g)^2 + (X_s - Z_g x_p - X_g + Y_g \Delta UT)^2} \quad (2.4)$$

Анализ выражения (2.4) позволяет сформировать компоненты смещения положения КА в новой системе координат, вызванной изменением ПВЗ, по отношению к положению его центра масс в прежней системе координат и, таким образом, формализовать вклад изменения ПВЗ в погрешность эфемерид КА в земной СК:

$$\Delta \rho = \begin{pmatrix} Y_g \Delta UT - Z_g x_p \\ -X_g \Delta UT + Z_g y_p \\ -X_g x_p + Y_g y_p \end{pmatrix},$$

где $\Delta \rho$ – вектор невязок эфемерид КА, вызванных погрешностями в прогнозировании ПВЗ. Обратимся вновь к выражениям для дальности (2.3) и (2.4). Приведем рассчитанные на их основе аналитические выражения частных производных, представляющие, по мнению авторов, самостоятельный интерес для разработчиков алгоритмов уточнения ПВЗ:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial x_p} &= -\frac{1}{k} (2(Z_g \cos y_p \sin x_p + X_g \cos \Delta UT \cos x_p \cos y_p - Y_g \cos x_p \cos y_p \sin \Delta UT) \times \\ &\quad \times (X_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p) - Z_s + Y_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \cos y_p) + 2(Z_g \cos x_p - X_g \cos \Delta UT \sin x_p + Y_g \sin \Delta UT \sin x_p) (X_s - Z_g \sin x_p - X_g \cos \Delta UT \cos x_p + \\ &\quad + Y_g \cos x_p \sin \Delta UT) + 2(Z_g \sin x_p \sin y_p + X_g \cos \Delta UT \cos x_p \sin y_p - Y_g \cos x_p \sin \Delta UT \sin y_p) \times \\ &\quad \times (Y_s - X_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - Y_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \sin y_p)), \\ \frac{\partial \rho}{\partial y_p} &= -\frac{1}{k} (2(X_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p) + Y_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - \\ &\quad - Z_g \cos x_p \sin y_p) (X_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p) - Z_s + Y_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \\ &\quad + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) + Z_g \cos x_p \cos y_p) + 2(X_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p) + \\ &\quad + Y_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) + Z_g \cos x_p \cos y_p) (Y_s - X_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \\ &\quad + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - Y_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) + Z_g \cos x_p \sin y_p)), \\ \frac{\partial \Delta UT}{\partial x_p} &= -\frac{1}{k} (2(X_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) - Y_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p)), \\ &\quad (X_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p) - Z_s + Y_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \cos y_p) - 2(X_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - Y_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p)), \\ &\quad (Y_s - X_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - Y_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) + Z_g \cos x_p \sin y_p) + \\ &\quad + 2(Y_g \cos \Delta UT \cos x_p + X_g \cos x_p \sin \Delta UT) (X_s - Z_g \sin x_p - X_g \cos \Delta UT \cos x_p + Y_g \cos x_p \sin \Delta UT)), \\ k &= 2 ((Y_s - X_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - Y_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \sin y_p) (Y_s - X_g (\cos y_p \sin \Delta UT + \cos \Delta UT \sin x_p \sin y_p) - Y_g (\cos \Delta UT \cos y_p - \sin \Delta UT \sin x_p \sin y_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \sin y_p) + (X_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p) - Z_s + Y_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \cos y_p) (X_g (\sin \Delta UT \sin y_p - \cos \Delta UT \cos y_p \sin x_p) - Z_s + Y_g (\cos \Delta UT \sin y_p + \cos y_p \sin \Delta UT \sin x_p) + \\ &\quad + Z_g \cos x_p \cos y_p) + (X_s - Z_g \sin x_p - X_g \cos \Delta UT \cos x_p + Y_g \cos x_p \sin \Delta UT) (X_s - Z_g \sin x_p - X_g \cos \Delta UT \cos x_p + \\ &\quad + Y_g \cos x_p \sin \Delta UT))^{0.5}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Корректность приведенных выше выражений в конечном счете проверялась путем использования их в процессе имитационного моделирования уточнения ПВЗ. В частности, при отсутствии каких-либо погрешностей применение этих выражений приводит к сходимости получаемых оценок к “истинным” значениям ПВЗ.

Итоговый облик выражений (2.5) может быть упрощен путем линеаризации тригонометрических функций:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial x_p} &= -((Z_g x_p + X_g - Y_g \Delta UT)(-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g) + (Z_g - X_g x_p)(X_s - Z_g x_p - X_g + Y_g \Delta UT) + \\ &\quad + X_g y_p (Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p))(((Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p)^2 + (-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g)^2 + \\ &\quad + (X_s - Z_g x_p - X_g + Y_g \Delta UT)^2)^{-0.5}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial y_p} &= ((X_g \Delta UT + Y_g - Z_g y_p)(-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g) + (-X_g x_p + Y_g y_p + Z_g)(Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p)), \\ &\quad ((Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p)^2 + (-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g)^2 + (X_s - Z_g x_p - X_g + Y_g \Delta UT)^2)^{-0.5}, \\ \frac{\partial \Delta UT}{\partial x_p} &= ((X_g y_p + Y_g x_p)(-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g)(X_g - Y_g \Delta UT)(Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p) + \\ &\quad + (Y_g + X_g \Delta UT)(X_s - Z_g x_p - X_g + Y_g \Delta UT)((Y_s - X_g \Delta UT - Y_g + Z_g y_p)^2 + (-X_g x_p - Z_s + Y_g y_p + Z_g)^2 + \\ &\quad + (X_s - Z_g x_p - X_g + Y_g \Delta UT)^2)^{-0.5}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

3. Выбор метода и построение алгоритма уточнения ПВЗ на основе измерений дальностей “КА – наземная станция”. Для обработки массива измерений дальностей целесообразно использовать метод наименьших квадратов (МНК), что обусловлено отсутствием необходимости “настройки” его работы, как это было бы в случае применения различных модификаций фильтра Калмана [1]. Реализованный авторами алгоритм обработки измерений базируется на каноническом уравнении следующего вида:

$$\Delta \bar{X}^* = (\mathbf{H}^T \mathbf{D}_\eta^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{D}_\eta^{-1} \Delta y^N,$$

где $\Delta \bar{X}^*$ – поправка к оценкам вектора состояния ПВЗ, сформированная на основе обработки выборки из N измерений – y^N ; \mathbf{D}_η – ковариационная матрица ошибок измерений, \mathbf{H} – блочная матрица частных производных (ЧП), принимающая в зависимости от режима работы алгоритма различные варианты облика, состав которого в общем случае имеет вид

$$\mathbf{H} = (\{\text{ПВЗ}\} \{\text{Измерения}\} \{\text{Эфемериды}\}), \quad (3.1)$$

где $\{\text{ПВЗ}\}$ – обязательный блок матрицы ЧП, включающий производные измерений дальности по компонентам вектора оцениваемых ПВЗ (3.1):

$$\{\text{ПВЗ}\} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial x_p} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial y_p} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial \Delta UT} \right)^T. \quad (3.2)$$

Блоки “Измерения” и “Эфемериды” – дополнительные блоки матрицы ЧП, которая в таком случае, как и оцениваемый вектор состояния, включает еще компоненты кроме исходных трех компонент ПВЗ. В случае применения МНК для оценки параметров линейной модели эволюции компонент ПВЗ блок ПВЗ примет отличный от (3.1) вид:

$$\{\text{ПВЗ}\} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial x_p} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial y_p} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial \Delta UT} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial x'_p} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial y'_p} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial \Delta UT'} \right)^T,$$

где $\partial y'_p$, $\partial x'_p$, $\partial \Delta UT'$ – скорость суточного изменения параметров ПВЗ x_p , y_p и ΔUT , измеряемая в mas/сут соответственно.

Блок $\{\text{Измерения}\}$, если используется в процессе оценивания МНК, включает ЧП измерений дальности по компонентам систематических ошибок измерений (например, погрешности измерения дальности, вызванные уходом шкал времени наземных станций) и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \{\text{Измерения}\}_i &= \underbrace{(0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1(i) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0)^T}_{N \text{ КА}}, \\ \{\text{Измерения}\}_j &= \underbrace{(0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1(j) \ \dots \ 0 \ 0)^T}_{N \text{ КА}}, \end{aligned}$$

где i, j – номера КА из серии N КА, измерения которых попадают в обработку.

Блок {Эфемериды}, если используется в процессе оценивания МНК, включает ЧП измерений дальности по компонентам систематических ошибок эфемерид КА (например, погрешности по радиус-вектору, бинормали и вдоль орбиты) и имеет следующий вид:

$$\{\text{Эфемериды}\}_i = \underbrace{\left(\begin{array}{ccccccc} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial \rho}{\partial r} & \frac{\partial \rho}{\partial n} & \frac{\partial \rho}{\partial l} & \dots & 0 & 0 \end{array} \right)^T}_{\substack{3 \times N \\ \text{КА}}}$$

где $\frac{\partial \rho}{\partial r}$ (близка к 1), $\frac{\partial \rho}{\partial n}$ и $\frac{\partial \rho}{\partial l}$ – производные выражения геометрической дальности по компонентам ошибок эфемерид i -го КА в направлении радиус-вектора, нормальном направлении и вдоль орбиты направлениях соответственно.

При накоплении M различных измерений матрица \mathbf{H} (3.1), представляющая собой в частном случае столбец размером $N \times 1$, где N – количество оцениваемых компонент вектора состояния решаемой задачи, превращается в матрицу $N \times M$, где в столбцах рассчитаны частные производные по каждому измерению. При использовании вектора состояния из шести компонент соответствующие значения матрицы \mathbf{H} в выражении (3.1) будут иметь несколько иной, отличный от выражений (2.5), (2.6) вид. В силу своей громоздкости все шесть компонент здесь не приводятся.

4. Анализ возможности оптимизации условий проведения измерений в интересах автономного уточнения ПВЗ на основе прогноза частных производных дальностей “КА-станция” по компонентам ПВЗ. Представленные выше соотношения, рассматриваемые далее как элементы алгоритма уточнения ПВЗ на основе МНК, перед применением на борту требуют разработки специального программного обеспечения, включающего дополнительно процедуры компенсации погрешностей измерений, погрешностей эфемерид КА и прочих факторов, привносящих погрешность в получаемые оценки ПВЗ. Иными словами, формирование полноценной технологии уточнения ПВЗ на борту КА на основе измерений до наземных станций представляет собой комплексную проблему, решение которой должно быть поэтапным и верифицироваться на каждом шаге с точки зрения работоспособности и эффективности путем имитационного моделирования. Необходимым условием реализации потенциальной возможности уточнения ПВЗ на основе развиваемой в данной статье концепции является оценка влияния эволюции ПВЗ на результаты измерений дальности “КА-станция”. Характер подобного влияния может быть оценен с использованием аналитических выражений для ЧП, рассчитываемых для КА созвездий спутниковых систем на средневисотных орбитах и разнесенных по поверхности Земли наземных станций. В качестве данных об эволюции ПВЗ при этом целесообразно использовать реальные бюллетени [7]. Ниже на рис. 1 представлены зависимости, описывающие эволюцию значений ЧП дальностей между средневисотным КА и станцией на поверхности Земли, расположенной около Владивостока, по компонентам ПВЗ в течение нескольких дней. Заметим, что зависимости имеют периодически повторяющиеся максимумы и минимумы, обусловленные переменным влиянием ПВЗ на получаемые измерения между КА и наземными станциями.

Характер и амплитуда зависимостей на рис. 1 показывают, что, во-первых, периоды, когда влияние ПВЗ на невязки измерений существенно, встречаются достаточно редко и имеют ограниченную продолжительность, во-вторых, “вес” изменения любого из ПВЗ такой, что угловое приращение одного из ПВЗ всего лишь в 1 mas приводит к росту невязок между реальными и прогнозируемыми измерениями дальностей между КА и станцией, составляющему в пике 2.5 см (при теоретическом максимуме 3.1 см). В среднем за день в зависимости от размещения станции и выбора КА (если не брать наихудшие условия и исключить зоны невидимости) размер невязки составляет 0.2–0.5 см в пересчете на 1 mas ПВЗ. Кроме того, заметно, что все компоненты ПВЗ оказывают одновременное влияние на размер невязок измерений, однако присутствуют моменты, когда влияние конкретного параметра из вектора ПВЗ начинает существенно превышать влияние других параметров. В силу разнообразия упомянутых в предыдущем разделе возмущающих факторов, таких, как погрешности измерений и эфемерид КА, фактической частоты сеансов измерений при использовании одного КА может оказаться недостаточным для уточнения ПВЗ. Оценим влияние эволюции ПВЗ на результаты измерений дальности “КА – станция” с помощью нескольких КА. Для этого построим зависимости ЧП дальностей между несколькими КА и наземными станциями по каждому ПВЗ отдельно. Полученные зависимости представлены на рис. 2–4.

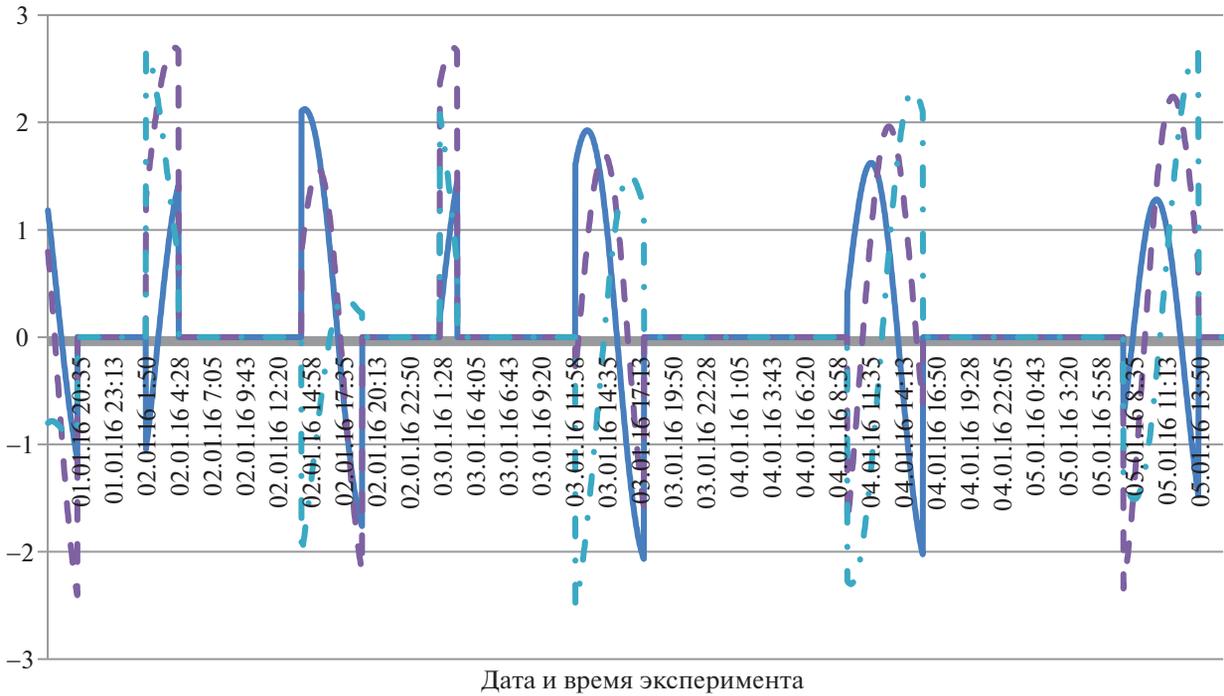


Рис. 1. ЧП дальностей по компонентам ПВЗ, см/мас: — x_p , y_p , - - - ΔUT

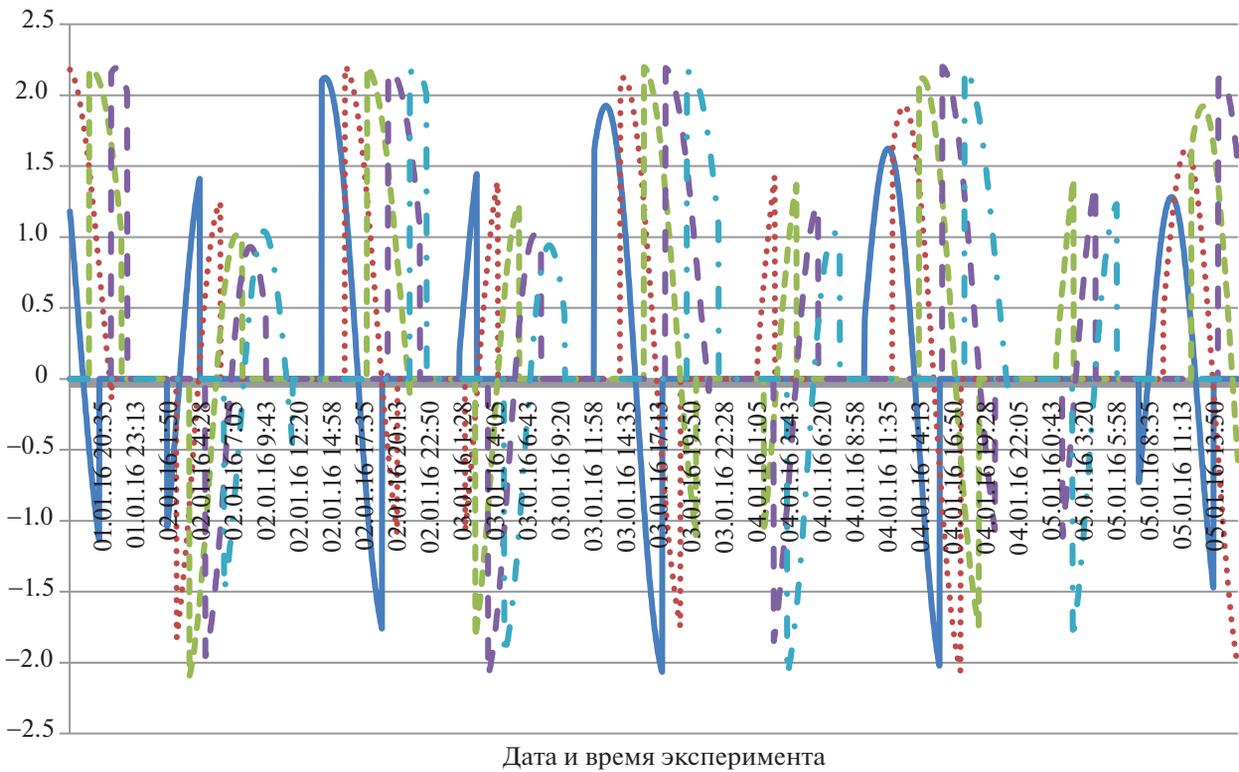


Рис. 2. ЧП дальностей по x_p для различных КА на близких орбитах средней высоты и одной наземной станции. Условный порядковый номер КА: — 1, 2, - - - 3, - · - · 4, ····· 5

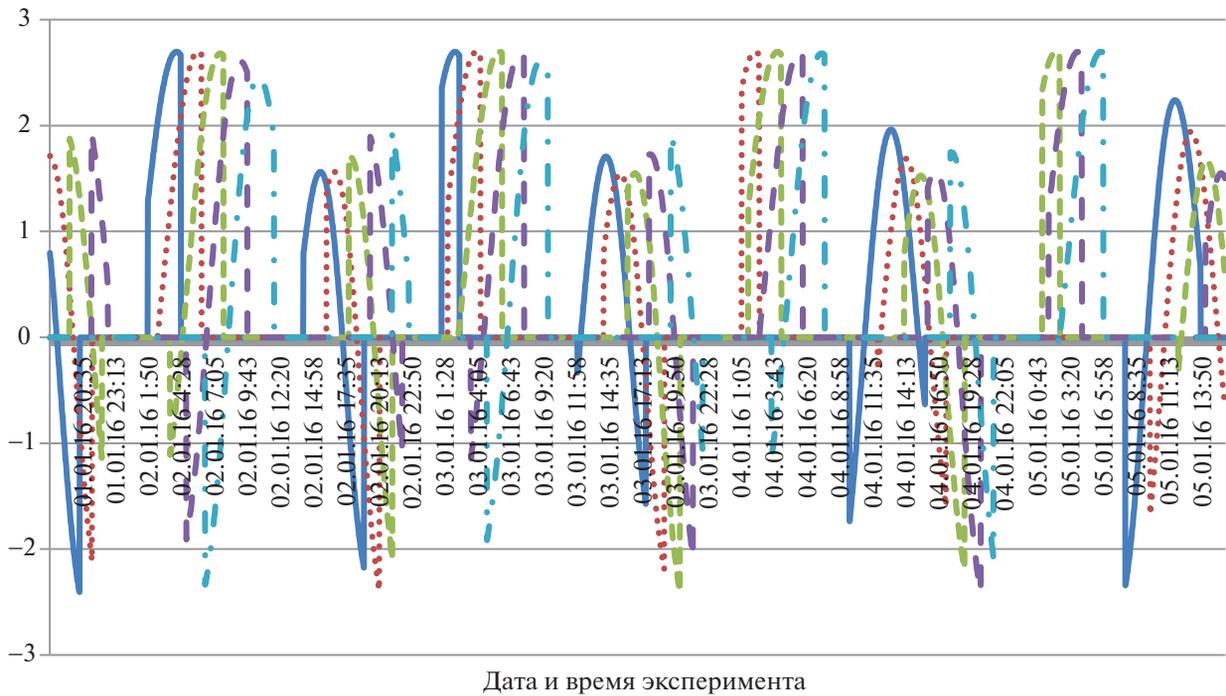


Рис. 3. ЧП дальностей по y_r для различных КА на близких орбитах средней высоты и одной наземной станции, см/mas. Условный порядковый номер КА: — 1, 2, - - - - 3, - · - · 4, - - - - 5

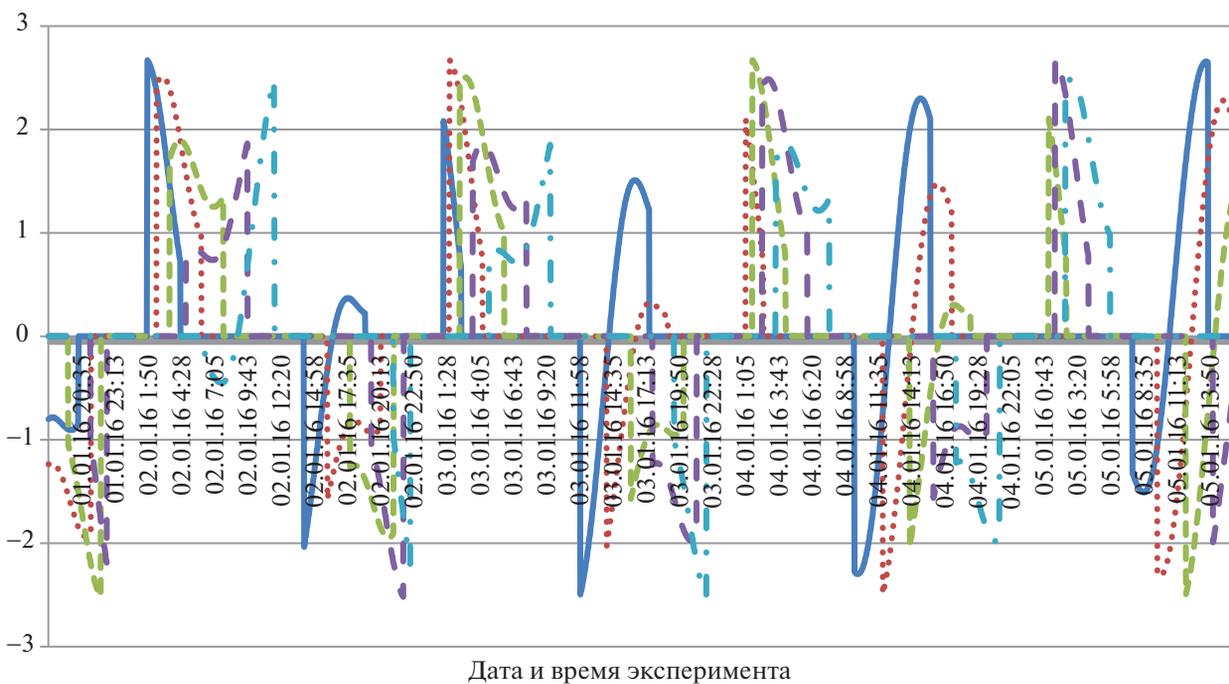


Рис. 4. ЧП дальностей по ΔUT для различных КА на близких орбитах средней высоты и одной наземной станции, см/mas. Условный порядковый номер КА: — 1, 2, - - - - 3, - · - · 4, - - - - 5

Анализ приведенных на рис. 2–4 зависимостей показывает, что при использовании КА на близких орбитах выявляется повторяемость кривых, описывающих ЧП дальностей между КА и наземной станцией. Данный факт позволяет говорить о возможности планирования экспери-

ментов в интересах непрерывности процесса получения максимального объема информативных измерений при фиксированном количестве КА, способных получать сигналы от наземных станций. В дальнейшем при построении полноценной процедуры уточнения ПВЗ на борту КА это обстоятельство следует считать решающим при планировании сеансов. Этот факт также является существенным с точки зрения потенциально достижимой точности получаемых оценок ПВЗ. Приведенные на рис. 2–4 результаты могут рассматриваться как исходные данные для решения задачи оптимизации эксперимента по уточнению ПВЗ. Авторами данной статьи развит подход, позволяющий решить эту задачу формально с использованием необходимых условий оптимальности [10]. Однако, сама по себе эта задача достаточно сложна, поэтому она может быть рассмотрена в самостоятельной работе.

5. Результаты моделирования процесса уточнения ПВЗ. Для получения результатов уточнения ПВЗ на борту КА с помощью описанных выше алгоритмов было проведено имитационное моделирование. Условия моделирования и особенности используемых моделей представлены ниже:

моделирование траекторий движения КА осуществлялось путем интерполяции окончательных данных Системы высокоточного определения эфемеридно-временных поправок с помощью специализированного программного обеспечения [11];

моделирование процессов вращения Земли с учетом прецессии, нутации, вращения и смещения полюсов производилось на основе моделей МСВЗ [6] и, в частности, их бюллетеней С04;

обработка измерений осуществлялась сериями, состоящими из набора накопленных на интервале нескольких часов измерений дальностей между КА и станцией; результатом обработки измерений служила оценка ПВЗ, используемая для последующего их прогноза и при формировании новой серии накопленных измерений.

Ниже приводятся основные результаты моделирования процесса уточнения ПВЗ на основе описанного выше алгоритма. В частности, на рис. 5 показаны две кривые: “истинная” эволюция компоненты x_p ПВЗ (x_{true}), т.е. построенная на базе данных из бюллетеней IERS, представляет собой гладкую кривую, и вторая – оценка компоненты x_p как результат обработки с помощью МНК дальностей между КА и станциями (x_{est}).

Достигнутый в данном эксперименте при использовании описанного выше алгоритма уровень ошибок оценок ПВЗ иллюстрируется ниже рис. 6, на котором приведены погрешности уточнения ПВЗ dx_p , dy_p и $d\Delta UT$ соответственно.

Амплитуды ошибок оценивания в данном эксперименте на уровне 2 СКО составляют не более 10 mas, т.е. ниже точности, обеспечиваемой использованием данных [7]. Моделирование проводилось в условиях влияния случайных и систематических погрешностей измерений, а также с

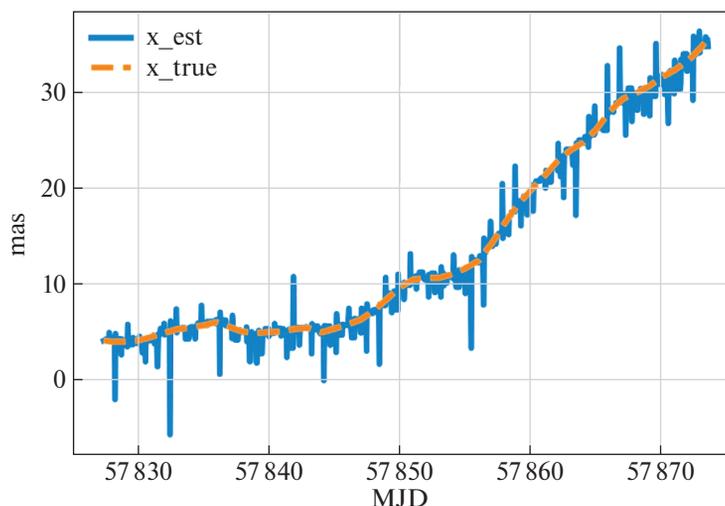


Рис. 5. Динамика “истинной” эволюции ПВЗ и оценки, полученной с использованием МНК. MJD – модифицированный юлианский день (Modified Julian Day)

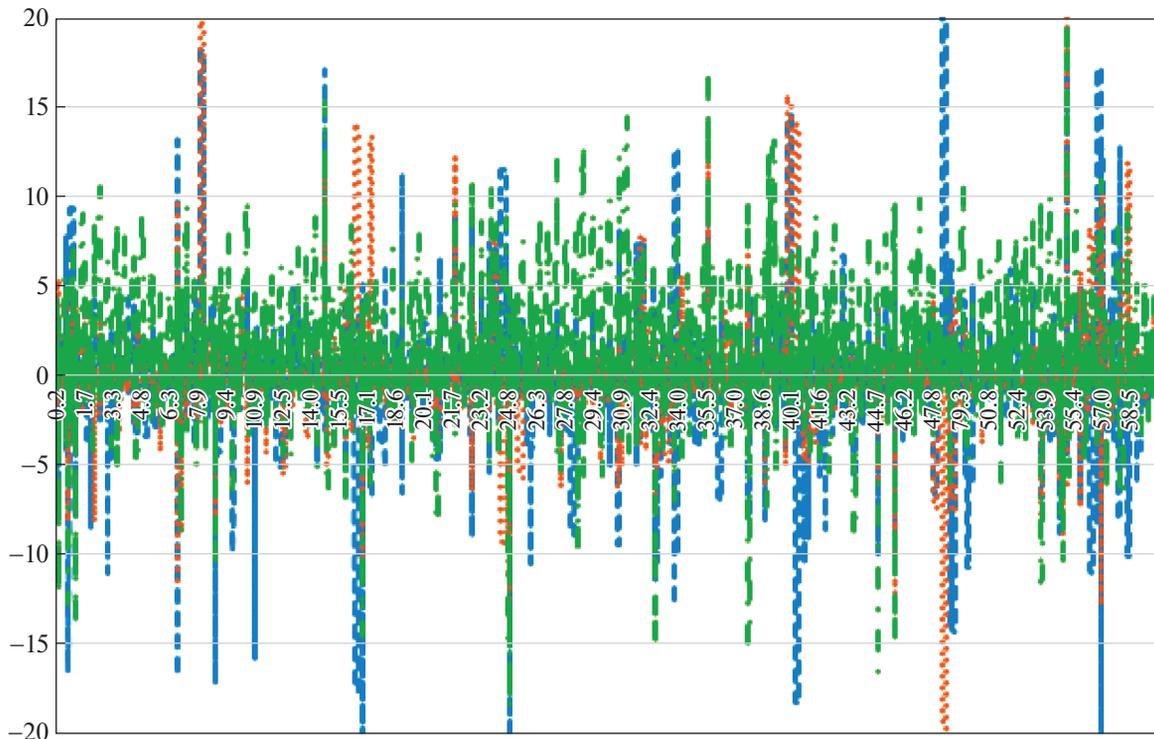


Рис. 6. Ошибки оценок ПВЗ, получаемые при итеративной обработке серий из 500 измерений, mas: — dx_p , dy_p , - · - · $d\Delta UT$

учетом растущих погрешностей эфемерид КА. Как показали эксперименты, погрешности оценок ПВЗ зависят от таких факторов, как:

динамика фактической эволюции ПВЗ;

количество и орбитальное размещение КА, участвующих в процессе уточнения ПВЗ;

количество и координаты в ЗССК наземных станций, участвующих в процессе уточнения ПВЗ;

уровень и динамика эволюции ошибок эфемерид КА, участвующих в процессе уточнения ПВЗ;

случайные и систематические погрешности проведения измерений дальностей между КА и наземными станциями;

длина мерного интервала, частота повторения значимых измерений, критерий планирования эксперимента и способ отбраковки измерений, условия повторной инициализации получаемых оценок на основе прогнозных значений ПВЗ. Как уже указывалось выше, результаты подобных исследований могут составить предмет самостоятельной статьи.

В дальнейшем предполагаются дополнительные исследования путем имитационного моделирования процессов функционирования прототипа бортового алгоритма уточнения ПВЗ с учетом влияния широкого спектра неконтролируемых факторов.

Заключение. В статье развита концепция уточнения бортовой модели прогноза ПВЗ на борту КА с использованием измерений между КА и наземными станциями. Предложена реализация развитой концепции в форме информационной технологии уточнения ПВЗ на борту КА в интересах улучшения точности при формировании эфемерид КА на борту и, в конечном счете, повышения качества предоставляемых потребителю соответствующих услуг. Предложен алгоритм уточнения эволюции ПВЗ на основе измерений дальностей между КА и наземными станциями. Приведены основные соотношения, необходимые для реализации алгоритма оценки ПВЗ, в том числе аналитические выражения для частных производных измерений дальностей “КА-станция” по компонентам вектора ПВЗ, позволяющие применять их для уточнения ПВЗ на борту КА. Приведены результаты имитационного моделирования процесса уточнения ПВЗ на борту, демонстрирующие погрешности оценок ПВЗ на уровне единиц mas. Определены закономерно-

сти, позволяющие осуществлять расчет и планирование сеансов измерений, проводимых, в том числе, с помощью нескольких КА. Полученные результаты, по мнению авторов, создают необходимые условия для дальнейшего проведения численных экспериментов по моделированию процессов уточнения ПВЗ на борту с учетом влияния широкого спектра неконтролируемых факторов и детализации бортовых алгоритмов в интересах уточнения ПВЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г., Сыпало К.И., Веремеенко К.К. и др. / Под ред. М.Н. Красильщикова. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. М.: Физматлит, 2009.
2. Гречкосеев А.К., Почукаев В.Н. Исследование задачи определения эфемерид системы ГЛОНАСС по межспутниковым измерениям на основе орбитального кристалла // Тр. МАИ. 2009. № 34. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8230> (дата обращения: 05.06.2019).
3. Wang H., Chen Q., Jia W., Tang C. Research on Autonomous Orbit Determination Test Based on BDS Inter-Satellite-Link on-Orbit Data // Proc. China Satellite Navigation Conf. (CSNC). Shanghai, 2017. V. III. P. 89–99.
4. National Geospatial-intelligence Agency (NGA) Standardization Document // World Geodetic System. 1984. Version 1.0.0. 07.08.2014. URL: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf (дата обращения: 05.06.2019).
5. Luzum. B. IERS EOP predictions. URL: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Workshops/Retreat2013/1_Luzum.pdf?_blob=publicationFile&v=1 (дата обращения: 14.05.2019).
6. 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).
7. Changes in 14 C04. Bulletin B. <https://hpiers.obspm.fr/>. 08.03.2018. URL: <http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc04/updateC04.txt> (дата обращения: 07.06.2019).
8. Bizouard C., Lambert S., Gattano C. etc. Combined solution C04 for Earth Rotation Parameters Consistent with International Terrestrial Reference Frame 2014 // J. Geodesy. 2019. № 93. P. 621–633.
9. Gambis D., Sail M. Combined EOP Solution Derived from GPS Technique. URL: <http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eop.others/README> (дата обращения: 14.06.2019).
10. Malyshev V.V., Krasilshchikov M.N., Karlov V.I. Optimization of Observation and Control Processes // AIAA Education Series. Washington DC, 1992. 349 p.
11. Akimov E.V., KruzHKov D.M., Yakimenko V.A. High-precision Simulation of Onboard Signal Receivers in Global Navigation Systems // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. № 2. P. 152–155.