

## **ОБ ОЦЕНКЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ КВНО ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СИСТЕМ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Л.Н. Лысенко, В.В. Корянов, А.Г. Топорков**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: kafsm3@bmstu.ru

*Выполнен анализ уровня востребованности точностных показателей современного фундаментального координатно-временного обеспечения существующих и перспективных спутниковых систем навигационного и телекоммуникационного назначений при решении практических задач баллистико-навигационного обеспечения. Показано, что соответствующий анализ влияния неопределенности знания параметров координатно-временного навигационного обеспечения на основе оценки требуемого баллистико-навигационного обеспечения спутниковых систем необходимо выполнять с учетом различий между теоретически достижимым уровнем точности параметров фундаментального координатно-временного обеспечения и их практически реализуемым уровнем точности. Установлено, что обсуждаемые в настоящее время требования к комплексу средств фундаментального координатно-временного обеспечения, предполагающие выход навигации на субметровые точности, являются, по крайней мере, для потребительских систем гражданского назначения завышенными не только для современного состояния, но и по отношению к отдаленной перспективе.*

**Ключевые слова:** глобальная навигационная спутниковая система, потребительские системы, баллистико-навигационное обеспечение, точность.

## **EVALUATION OF SATELLITE NAVIGATION ACCURACY REQUIREMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF COMMERCIAL COORDINATE AND TIME NAVIGATION SUPPORT SYSTEMS**

**L.N. Lysenko, V.V. Koryanov, A.G. Toporkov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: kafsm3@bmstu.ru

*The paper presents the analysis of the essential accuracy level expected from the modern fundamental coordinate and time data of both existing and prospective satellite navigation and telecommunication systems, while solving the real-world problems of ballistic and navigational support. The paper shows that the respective analysis of the effect of the navigational coordinate and time data uncertainty should be performed based on the estimates of the required ballistic and navigational support of the satellite systems, taking into account the differences between the theoretically attainable level and the practically feasible level of the accuracy for the fundamental coordinate and time data. The authors found out that the currently discussed requirements for the fundamental coordinate and time support complex, which involve a navigation access to a submeter accuracy, at least for the commercial systems, are overestimated not only for the current state, but also for the long term systems.*

**Keywords:** global navigation satellite system, commercial systems, ballistic and navigational support, accuracy.

Достижение национальной безопасности и экономической независимости страны невозможно без использования отечественных средств координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО).

Определяющим системообразующим элементом современного КВНО является созданная и успешно эксплуатируемая в РФ глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС). С развитием ГЛОНАСС внедрение навигационных технологий в повседневную жизнь и деятельность государства стало приобретать массовый характер.

Как следствие, со временем возникла самодостаточная интегрированная система, предоставляющая пользователям возможность создавать самостоятельные специализированные потребительские системы (ПС), способные решать задачи КВНО в конкретных условиях функционирования с заданным уровнем надежности и точности.

К числу основных (по назначению) ПС относятся:

- системы потребителей специального назначения (Минобороны, МВД, МЧС, ФСБ и другие силовые структуры);

- гражданские системы потребителей государственного значения, применение которых связано с обеспечением безопасности и требуемого уровня качества жизнедеятельности населения.

Использование средств КВНО в них осуществляется в интересах:

- автоматизированных систем управления вооруженными силами и средствами вооружения;

- систем управления всеми видами транспортных средств (воздушного, водного, наземного транспорта);

- средств и систем управления космическими объектами различного назначения, в том числе и навигационного;

- автоматизированных систем контроля безопасности (включая системы поиска и спасения терпящих бедствие), а также повышения эффективности перевозок пассажиров и грузов;

- систем мониторинга результатов народно-хозяйственной деятельности (сельского хозяйства, природопользования, кадастровых и строительных работ и др.);

- высокоточных систем проведения геодезических работ;

- сетевых систем связи и т.д.

Вне зависимости от конкретного назначения и ведомственной принадлежности ПС, использующих технологии спутниковой навигации, базовым фактором, определяющим достижение их предельных (по точности) возможностей, служит уровень достоверности фундаментального координатно-временного обеспечения (ФКВО), без наличия которого невозможно создание удовлетворяющих частным требованиям специализированных ПС.

Главными задачами ФКВО принято считать:

- формирование небесной системы координат (СК) и ее практической реализации в виде высокоточного каталога координат источников различных диапазонов длин волн;

- определение связи между разными небесными СК, прежде всего, между радиоастрономической и оптической системами;

- задание виртуальной земной базовой СК и ее построение в формате каталога координат опорных станций;

- создание адекватных моделей и расчет глобальных и локальных трехмерных движений точек земной коры в целях сверхточного определения положения центра масс (ЦМ) Земли;

- определение параметров взаимной ориентации небесной и земной СК (параметров вращения Земли);

- уточнение параметров Солнечной системы — фундаментальных астрономических постоянных;

- построение динамических СК и их реализацию в формате высокоточных теорий движения тел Солнечной системы и искусственных спутников Земли (ИСЗ), прежде всего, навигационных ИСЗ;

- уточнение параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ) и тел Солнечной системы;

- создание и поддержание высокоточной шкалы атомного времени и эталонных частот;

- получение и трансляцию текущей информации о состоянии тропосферы и ионосферы Земли, состоянии солнечной активности и др.

Взаимосвязь ФКВО и КВНО, с одной стороны, является очевидной: уровень КВНО однозначно определяется достигнутым уровнем развития ФКВО (бессмысленно ставить задачи повышения эффективности КВНО без их предварительного обеспечения на уровне ФКВО), с другой стороны — весьма неопределенной из-за отсутствия корректно и достоверно установленных пределов точности востребованных характеристик и параметров ФКВО и тем более невозможности строгого учета уровня их неопределенности в баллистико-навигационном обеспечении (БНО) спутниковых навигационных систем (СНС).

В этой связи следует учитывать, что основные показатели эффективности КВНО ПС, интегрально определяемые погрешностью местопредопределения, доступностью, целостностью и непрерывностью навигационного поля (НП), не могут быть напрямую увязаны с численными точностными значениями параметров ФКВО.

В то же время понятно, что выход на новый уровень требований к КВНО невозможен без проведения дальнейших исследований в области ФКВО. Эти исследования весьма многообразны и чрезвычайно сложны, а измерительные средства уникальны [1]. Освоение и развитие соответствующей области знаний требует существенных временных затрат, больших усилий и значительных материальных ресурсов,

что делает актуальным оценку обоснования требований к уровню необходимой точности навигационных определений на основе радионавигационных спутниковых систем (РНСС).

**Понятие и показатели точности спутниковых навигационных определений.** Численные показатели основных потребительских свойств ПС (доступность, непрерывность, целостность) в значительной степени зависят от точностных характеристик КВНО РНСС и погрешностей информационного обеспечения потребителей спутниковой навигационной информацией. Эти погрешности являются функцией многих факторов, наиболее существенными из которых принято считать: погрешности знания состояния космического сегмента, прежде всего погрешности определения эфемерид; погрешности распространения (ионосферные и тропосферные) и приема (эффект многолучевости) навигационных сигналов и погрешности аппаратуры спутниковой навигации.

Под доступностью НП понимается процент относительного времени, либо вероятность получения навигационной информации потребителем, в течение которого пространственный геометрический фактор (PDOP) не отличается от допустимого значения для любой точки пространства в зоне действия системы. Погрешность пространственных определений местоположения потребителя задается с вероятностью 0,95, что соответствует значению  $\pm 2\sigma_D$  для гауссова закона распределения.

Оперативное эфемеридное обеспечение (ЭО) навигационных ИСЗ (НИСЗ) включает в себя определение и прогноз параметров орбиты в инерциальной СК, расчет параметров вращения Земли (ПВЗ) и пересчет параметров движения спутника с использованием ПВЗ в неинерциальную СК действующей версии (характеризуемой существующим уровнем неопределенности параметров ФКВО), обновление с необходимой периодичностью (не превосходящей “интервал старения”) этих данных на борту НИСЗ для кадров цифровой информации в навигационных радиосигналах, включая параметры альманаха.

Расчет как самих эфемерид, так и их фактора точности проводится на основе результатов измерений дальности запросных и/или псевдодальностей беззапросных систем (БС), а также, в отдельных случаях, данных радиоинтерферометрии измерительных систем со сверхдлинной базой (РСДБ).

Орбиты уточняются по суточному плану на каждом витке, причем мерный интервал уточнения эфемерид соответствует замыканию трассы спутника с перекрытием. В системах высокоточного определения эфемерид и временных поправок в интересах ЭВО выполняется обработка только измерений БС глобальной сети. В них также проводится расчет долгосрочного (до 90 суток) прогноза состояния альманаха и

оперативных кадров цифровой информации, длительностью до 10 суток для поддержания ассистирующих технологий.

Обычно считается (впрочем, без достаточных на то оснований), что погрешность собственно определения эфемерид в сигналах стандартной точности примерно в 2–3 раза ниже погрешностей, обусловленных ошибками задания частотно-временных (ЧВ) параметров.

Оперативное ЧВ обеспечение (ЧВО) реализует синхронизацию бортовых часов относительно шкалы времени системы (ШВС) посредством расчета и прогнозирования бортовой шкалы времени (БШВ) относительно ШВС с обновлением на борту ЧВ поправок (ЧВП), помещаемых в навигационных кадрах.

Для прогноза БШВ на 8...12 ч используется двухсуточный массив результатов измерений, который аппроксимируется линейным полиномом на интервале экстраполяции.

При обновлении ЧВП на каждом витке СКО погрешностей взаимной синхронизации БШВ любых двух НИСЗ примерно составляет от 5 до 8 нс, что привносит погрешность в определение местоположения потребителя на уровне 2,0 до 2,8 м (2СКО), причем обеспечить равнозначность данных ЧВП для всех спутников системы в принципе не представляется возможным. На современном уровне отличия в точности ЧВП между “лучшим” и “худшим” НИСЗ могут превосходить 5–6-кратные.

Казалось бы, что изложенные соображения могут служить вполне внятным основанием для однозначного определения точностных характеристик как отечественной ГЛОНАСС, так и американской GPS (Global Positioning System) и их сопоставления.

Не все, однако, так просто. Обычно приводимые в литературе данные следует рассматривать как достаточно условные и приближенные. Дело заключается в следующем.

1. На точность навигационных определений существенным образом влияет расположение ИСЗ в созвездии относительно потребителя. Для планирования навигационного обеспечения в различных районах Земли необходимо располагать картами равной точности, на которые должны быть нанесены линии равных значений PDOP. Поэтому для глобальной СНС можно говорить лишь о потенциальной точности навигационных определений, совокупность которых образует “поле точностей СНС”. При этом поле точности меняется во времени из-за движения ИСЗ относительно поверхности Земли и вариаций конфигурации выбранного созвездия.

Если структура СНС регулярна, т.е. повторяется через определенный промежуток времени, то в поле точности может быть выделена элементарная структура (зона), которая повторяется во времени и пространстве. Для прообраза GPS — системы “Навстар”, например, размеры такой зоны (области) составляли [2] 1,5 ч по времени и 60° по

долготе. При этом в рассматриваемый период (начало–середина 80-х годов прошлого столетия) СКО определения места объекта с помощью указанной системы составляло соответственно 7... 25 м, высоты 10... 43 м, предельная погрешность измерения радиальной скорости находилась на уровне 0,06 м/с.

В случае наихудшего расположения рабочего созвездия, СКО уже возрастало по месту до 100... 1000 м, а по высоте до 130 м.

2. Точностные характеристики РНСС подвержены столь быстрым изменениям, что сопоставление разных систем возможно лишь для одного и того же малого временного интервала. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что на интервале порядка 25 лет точность навигационных определений с использованием РНСС улучшилась, как минимум на порядок.

3. Сопоставление уровня точности навигации для различных спутниковых систем возможно лишь при наличии хотя бы сходных предпосылок для достижения той же цели, что не всегда принимается во внимание. Как следствие, приводятся результаты сопоставления точностных характеристик ГЛОНАСС с GPS в структуре глобальной системы WAAS (Wide Area Augmentation System) дифференциальной навигации (GDGPS), использующей до 30 станций в избыточном варианте, либо минимум 12 станций, гарантированно оптимально расположенных по всей территории земного шара. Достижение соответствующего “сопоставительного” уровня для ГЛОНАСС окажется возможным при расширении сети существующих БЗ станций (учитывая антарктические) путем их размещения в Австралии, Новой Зеландии, Индонезии, на островах юга Тихого океана, Африке, а также, желательно, в Южной и Северной Америке.

При всей условности имеющихся оценок все же объективно можно считать [3], что при малых углах затенения (при угле места сигналов до  $5^\circ$ ) орбитальная группировка (ОГ) ГЛОНАСС-24, обеспечивая 100%-ную доступность навигации, кроме небольших зон на широтах  $\pm 28^\circ \dots \pm 30^\circ$ , по точности уступает GPS практически на 20%; при больших углах затенения (угол места  $\geq 25^\circ$ , что соответствует городским и горным условиям) ОГ ГЛОНАСС-24 в 1,5–2 раза уступает по глобальной доступности не только GPS, но и СНС GALILEO-27(ЕС) и COMPASS (КНР).

Оставляя в стороне проблемы доступности, выскажем предположение, что именно имеющееся отставание по точности навигации от GPS (США) явилось побудительной причиной для формулировки требования текущего этапа развития ГЛОНАСС, ориентированного на достижение точности навигационных определений до 0,1... 0,6 м (СКО), существенно превосходящую гарантируемую точность эксплуатируемой системы.

**Оценка востребованности показателей современного уровня точности спутниковой навигации.** Достижение указанного ранее уровня точности навигационных определений выдвигает, как следует из многочисленных заявлений представителей Института прикладной астрономии РАН (см. например, “Фундаментальное координатно-временное обеспечение: 2010–2020 гг.” ИПА РАН, 2010 г., а также материалы “КВНО-2013”, 15–19 апреля 2013 г. СПб.), требование к точности фундаментального сегмента КВО на уровне порядка 3 см при определении положения центра геоида (геоцентра) с погрешностью не более 1 см, земной СК —  $5 \cdot 10^{-10}$  (3 мм по координатам), а в части небесной СК — точность положения должна характеризоваться уровнем 0,02 мс дуги для стандарта ICRF и 0,1 мс дуги для геодезических источников.

Чтобы были понятны условия достижимости таких требований, отметим, что они не могут быть гарантированы без установки радиомаяков для РСДБ — наблюдений на полюсах Луны, определения эфемерид тел Солнечной системы — на уровне  $10^{-11}$ , суточной нестабильности стандартов частоты и времени от  $1 \cdot 10^{-16}$  до  $5 \cdot 10^{-17}$  с и, наконец, суточного прогноза орбит спутников ГЛОНАСС с точностью более 1 мм. О несбыточности, по крайней мере, последнего условия, в принципе, говорить не приходится.

Но если это так, естественно возникает вопрос о практической обоснованности сформулированных требований по гарантированному уровню точности ФКВО.

При этом отметим, что соответствующий анализ влияния неопределенности знания параметров КВНО РНСС на основе точности их требуемого БНО необходимо осуществлять с учетом различий между теоретически достижимым уровнем точности параметров ФВКО и их практически реализуемым уровнем точности, определяемым требованиями конкретных (в частности, космических) потребителей.

Отсюда вытекает, как минимум, два аспекта получения ответа на поставленный вопрос.

1. Существуют ли какие-либо альтернативы повышению уровня точности ФКВО для достижения желаемого уровня точности навигационных определений потребителей?

2. Какова действительная востребованность современного уровня точности спутниковой навигации, по крайней мере, со стороны основных потребительских систем гражданского назначения?

Для лучшего понимания существа первой части обсуждаемого вопроса ограничимся анализом проблем БНО геостационарных искусственных спутников (ГСИС). Сколь бы точно мы не определяли параметры ФВКО, абсолютной точности их знания добиться невозможно, а следовательно, практически невозможно и обеспечить выполнения фактических условий стационарности.

Объективно, имеющиеся неопределенности знания таких факторов, как нецентральность ГПЗ, неточность знания притяжения Солнца, Луны, Венеры, Юпитера и других внутренних планет Солнечной системы, прямое и отраженное световое давление, приливные деформации Земли, океанские приливы, поправки общей теории относительности и других факторов, неизбежно будут приводить к смещению (дрейфу) спутника относительно земной поверхности.

Несмотря на то что ускорения, испытываемые от, скажем, прямого светового давления (уровня  $10^{-7}$  м/с<sup>2</sup>) и приливных деформаций Земли (уровня  $10^{-10}$  м/с<sup>2</sup>), составляют, на первый взгляд, практически неосязаемые величины, через 30 суток вызванные ими максимальные отклонения от номинальной точки стояния составят соответственно примерно, 2,4 и 8,5 м.

Как следствие, напрашиваются следующие возможные пути решения проблемы: либо все же повышать точность и достоверность знаний параметров ФВКО, насколько это возможно, и технически реализовывать прецизионный БНО, либо сознательно (с учетом имеющихся возможностей технических систем) ограничить допустимую точность БНО до уровня разрешенных отклонений, вызываемых дрейфом, с поддержанием параметров орбиты наиболее близко к идеальным стационарным значениям в районе заданной точки стояния посредством управления движением центра масс ГСИЗ, состоящего в периодическом проведении коррекций его орбиты.

У первых поколений выводимых на ГСО спутников корректировались, как правило, лишь параметры, определяющие смещение спутника по долготе так, чтобы спутник гарантированно оставался в пределах “геостационарного пояса” (“пояса Кларка”).

За прошедшее время многое изменилось. Используемые в прошлом классические методы определения эфемерид и, как следствие, астрономических постоянных планет и Луны основывались главным образом на оптических наблюдениях. Революционным явилось широкое применение радиотехнических и особенно лазерных астрономических измерений. Именно благодаря этим данным ситуация, по крайней мере для внутренних планет, радикально изменилась. По мере накопления результатов измерений, получаемых с использованием АМС (главным образом Viking, Pathfinder, MGS и Odyssey), были разработаны высокоточные теории определения эфемерид внутренних планет с точностью миллисекунд дуги. При этом СКО наблюдений приблизительно оценивались значениями: для Меркурия — 1,4 км, для Венеры и Марса — 0,7 км, для АМС Viking — 8,8 м, Pathfinder — 5,1 м, MGS и Odyssey — 1,4 м.

Как следствие, удалось создать высокоточные динамические модели эфемерид планет и Луны (ЕРМ). Лучшая из действующих зарубежных моделей DE405/LE405 при этом превосходит, например, ранее



используемую модель DE200/LE200 по точности задания астрономической единицы (а.е.) длины (а.е. = 149597870696,3; 0,1) на несколько порядков. Разработанная ИПА РАН модель сопоставима по точности с указанной DE405/LE405. Отечественная динамическая модель EPM2004 (Pitjeva, 2004) учитывает взаимные возмущения больших планет и Луны, сжатие Солнца, эффекты, связанные с физической либрацией Луны, возмущения от 301 крупнейшего астероида и массивного астероидного кольца, расположенного в плоскости эклиптики. Эфемериды переведены в систему ICRF и согласованы с резолюциями XXIII и XXIV Генеральных ассамблей Международного астрономического союза. Эфемериды РМ представлены на сайте ИПА РАН ([www.ipa.nw.ru](http://www.ipa.nw.ru)) и доступны внешним пользователям.

Применительно к уточнению геодезических параметров Земли для уточнения резонансных гармоник ГПЗ, в первую очередь в интересах GPS, в середине 1980-х годов в США была реализована программа COGOES (Международная программа оптических наблюдений геостационарных спутников).

Отметим, кстати, что в СССР на тот период отсутствовали условия реализации геодезического и геофизического обеспечений требуемого уровня, обусловленные отсутствием отечественных специализированных КА, подобных используемым в США для повышения точности эфемеридного обеспечения НИСЗ систем типа GPS.

Тем не менее разработанная в качестве альтернативы баллистиками 50 ЦНИИ МО совместно с баллистиками ИПМ им. М.В. Келдыша теория построения согласующих моделей движения КА и комплекс методов высокоточного определения параметров орбит с уточнением на их основе фундаментальных постоянных позволили сотрудникам ЦУП ГЛОНАСС в значительной степени усовершенствовать СПМО высокоточного определения параметров движения как навигационных спутников, так и спутников, размещаемых на ГСО [4].

Это, в свою очередь, позволило повысить уровень точности БНО выведения ГИСЗ в официально заявляемую точку стояния на ГСО, а также найти приемлемый компромисс по величине зоны нечувствительности допустимых отклонений спутника от номинала, определяющей величину энергетических затрат на коррекцию орбиты с одной стороны, и, с другой, — ограничений на минимально допустимые угловые расстояния между соседними спутниками на ГСО, устанавливаемых международными соглашениями, исходя из соображений электромагнитной совместимости спутниковых радиолиний. Соответствующим регламентирующим документом при этом служит “Регламент радиосвязи” / Edition of 2004. No. 119-04-REV-04, вводящий ограничение в  $\pm 0,1^\circ$  в недавнем прошлом, с доведением до  $\pm 0,05^\circ$  в настоящее время, для отклонения спутника по долготе относительно номинальной точки стояния.

Для того чтобы выполнить требуемые корректирующие маневры удержания спутника на заданной долготе и широте с минимальными энергетическими затратами и достаточной точностью, необходимо иметь наиболее достоверную информацию о параметрах реальной орбиты. Процесс навигации опирается на проведение измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) с помощью специальных измерительных средств и статистическую обработку результатов измерений с использованием наиболее рациональных математических моделей и вычислительных схем, входящих в состав реализуемого БНО.

При этом для большинства практических применений ГИСЗ, в принципе, оказывается достаточным учет влияния следующих возмущений:

- составляющих силы ГПЗ с удержанием гармоник сферических функций геопотенциала не выше 8-го порядка (при известности параметров 36 гармоник для модели WG84 и 70 для модели EGM96);
- гравитационного притяжения Солнца и Луны как точечных масс;
- прямого светового давления;
- ошибок реализации вектора тяги КДУ (модуля и ориентации).

Что же касается ответа на вторую часть поставленного вопроса, то он требует детального рассмотрения требований к навигационному обеспечению различных гражданских объектов, осуществляемому, в частности, с помощью СРНС, сформулированных в Радионавигационном плане РФ, утвержденном приказом Минпромторга РФ № 118 в редакции приказа № 1177 Минпромторга РФ от 31 августа 2011 года.

Соответствующие данные, приведенные в Радионавигационном плане РФ, мало отличаются от требований аналогичных национальных радионавигационных планов других стран, в частности США [5].

Из данных обобщенных требований практически по большинству ПС КВНО следует, что ни одна из рассмотренных потребительских систем не предполагает необходимости выхода на уровень средних значений СКО сантиметровых точностей решения задач навигационных определений с использованием спутниковых навигационных систем.

В качестве исключения могут быть отмечены лишь предельные (максимальные) уровни точности погрешностей определения при заходе и посадке авиационных средств по категориям ИКАО (max 0,2 м, min 2 м) и перспективные уровни точности маневрирования и проведения спецработ в акватории водоемов и портов (max 0,1 м, min 3,5 м). Подчеркнем еще раз, что речь идет о предельных уровнях точности, которые в большинстве случаев не принято закладывать в проектные разработки.

Отдельного внимания заслуживают требования ПС геодезического обеспечения и высокоточного мониторинга смещений сложных инженерных сооружений.

Сантиметровые точности государственной геодезической сети РФ (ГКИНП (ГНТА)–01-006-03, М., 2004) определены Законом (№ 209–ФЗ (с изменениями) от 26.12.1995), исполнение которого обязательно для всех субъектов геодезической и картографической деятельности.

Отметим, что для решения прикладных задач геодезии измерения выполняются относительно пунктов опорной геодезической сети с использованием способов **относительных определений**. Государственная геодезическая сеть при этом базируется не только на спутниковой геодезической сети 1 класса (СГС-1), но и на фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), а также на высокоточной геодезической сети (ВГС). В данную систему к тому же вписаны давно существующие и широко используемые сети триангуляции и полигонометрии различных классов. Ко всему прочему за отсчетную поверхность, в частности в СК-95, принята не истинная поверхность Земли, а поверхность референц-эллипсоида Красовского.

В указанной постановке выход на сантиметровый уровень точности астрономо-геофизических сетей в сочетании с новыми высокоточными пунктами спутниковой сети постоянно действующих дифференциальных станций, естественно, не является неразрешимой проблемой. Более того реальным следует считать и миллиметровый уровень, актуальный для решения некоторых задач геодинамики (прогнозирование землетрясений в сейсмоактивных районах). Что же касается декларируемого миллиметрового уровня точностей кадастровых съемок и закрепления границ землепользования, то к подобным требованиям нельзя относиться серьезно. Здесь, как минимум, желаемое (но отнюдь никак не обоснованное) выдается за действительное.

Менее очевидной является ситуация с уровнем требований по высокоточному мониторингу смещений инженерных сооружений (ВМСИС) с использованием технологий ГЛОНАСС (см. например, Бугринский мост через реку Обь, имеющий длину свыше 2 км; планируемый к созданию мостовой переход через Керченский пролив и т.д.).

Контроль стабильности сложных инженерных сооружений, согласно ГОСТ Р 53607–2009, действительно возможен лишь при достижении уровня точности от 1 до 5 мм. Для получения указанного уровня в режиме RTK, определение “базисной линии” достижимо лишь в результате длительного времени наблюдений по результатам апостериорной обработки накопленной информации. Ко всему тому сооружение должно быть снабжено специальными техническими средствами, взаимодействующими с ГЛОНАСС. Имея в виду, что обсуждаемая задача, как известно, достаточно просто решается с использованием прецизионных гироскопических систем, встроенных в конструкцию, не факт,

что методы спутниковой навигации смогут оказаться здесь конкурентоспособными. Поэтому необходимость достижения миллиметрового уровня точности СНС применительно к задачам рассматриваемого типа также не очевидна.

Это дает основание считать, что с точки зрения практических запросов потребителей спутниковой навигации, по крайней мере гражданского назначения, существующие требования к уровню точности комплекса средств ФКВО представляются завышенными.

Что же касается обеспечения требуемого уровня точности даже самых “высокоточных” космических объектов, то, как известно, переснащаемые в настоящее время средства НАКУ позволяют или позволят уже в ближайшей перспективе осуществлять измерения параметров орбит КА в диапазоне высот 200... 40 000 км с точностью (по уровню предельной ошибки) по дальности 1,0... 30,0 м и радиальной скорости 0,001... 0,003 м/с. Такие точности вполне достаточны для высокоточных навигационных определений большинства существующих типов КА, в частности, например, для удержания спутников связи типа “Экспресс-А” в допустимой области  $\pm 0,05^\circ$ , предполагающей необходимость определения параметров их орбит на уровне: 0,9 угл. мин — широту подспутниковой точки; 0,3 угл. мин — долготу подспутниковой точки; 0,15 с — периода обращения спутника.

Такие возможности, в частности, представляются при реализации однопунктной технологии управления на основе КИС семейства “Тамань–База”, имеющих [6] следующие основные характеристики: измерения дальности с предельной погрешностью не более 1 м; измерения углов с межсеансовым разбросом систематической ошибки не более 0,2... 0,5 угл. мин.

Удовлетворение же повышенных требований БНО перспективных космических средств может быть обеспечено исключительно на основе привлечения аппаратуры спутниковой навигации.

Изложенное позволяет сделать следующие основные **выводы**.  
1. Уровень требований к навигационному обеспечению со стороны различных категорий потребителей, полученный на основе обобщения данных Радионавигационных планов РФ и США на конец 2010 г., дает основание заключить, что ни одна из существующих ПС КВНО не предполагает необходимости выхода на уровень средних значений СКО сантиметровых точностей решения задач навигационных определений с использованием спутниковых навигационных систем.

В связи с этим требования к комплексу средств ФКВО на уровне знания положения геоцентра с погрешностью, не превосходящей 1 см, земной СК —  $5 \cdot 10^{-10}$  (3 мм по координатам), небесной СК — 0,02 мс дуги для стандарта ICRF и 0,1 мс дуги для геодезических радиосточников, представляются завышенными.

2. Учитывая, что достижение указанных значений ориентировано на необходимость обеспечения в принципе недостижимого суточного прогноза орбит спутников ГЛОНАСС с точностью более 1 мм, указанные требования представляются избыточными не только для современного состояния проблемы, но и по отношению к отдаленной перспективе.

3. Ошибки навигации вызываются не только ошибками определения параметров орбиты по данным обработки результатов ИТНП, но также и ошибками прогнозирования из-за неточности описания действующих сил, включая ошибки исполнения маневров.

Не учет данного обстоятельства, обуславливается прежде всего теми соображениями, что максимальный интервал прогноза эфемерид и ЧВП, используемый в ЭВО системы, всегда меньше заранее определенного интервала “старения”, который, как обычно предполагается, всегда можно уменьшить, если его используемое значение начинает оказывать заметное влияние на точность ТХ ЭВО системы.

В настоящее время интервал “старения” ЭВИ в системе ГЛОНАСС для стандартного (штатного) периода функционирования системы составляет 12...14 ч. Таким образом, принято полагать, что полусуточный прогноз эфемерид и ЧВП по ИТНП практически не должен приносить погрешностей, либо они настолько малы, что ими можно пренебречь. На самом деле все определяется требуемым уровнем точности навигационных определений. Для современного “метрового уровня” погрешностями полусуточного прогноза можно пренебречь, но выход на “сантиметровый уровень” уже в корне меняет ситуацию. Уменьшение интервала “старения”, на которое принято ссылаться в качестве “элементарного средства решения проблемы” не является беспредельным и не может служить гарантией решения проблемы.

4. Для того чтобы обеспечить заданное достаточно малое (во всяком случае, существенно меньшее существующего) значение интервала старения ЭВИ необходимо, чтобы измерения сети КИС, по которым осуществляется уточнение эфемерид и ЧВП, не имели бы перерывов, больших требуемых интервалов “старения” и чтобы топология закладочных измерительных станций НАКУ обеспечивала бы закладки с соответствующим периодом.

Действующая закладочная сеть НАКУ позволяет увеличить частоту закладок не более чем на 1–2 ч, что недостаточно для достижения перспективного уровня точности спутниковой навигации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Финкельштейн А.М., Ипатов А.В., Скурихина Е.А.* Фундаментальное координатно-временное обеспечение системы ГЛОНАСС средствами РСДБ-сети “Квазар-КВО”: Труды ИПА РАН. СПб.: Наука, 2007. Т. 77. № 7. С. 608–617.

2. Лысенко Л.Н., Панкратов И.А. Основы спутниковой навигации. М.: Воениздат, 1988. 328 с.
3. Ступак Г.Г., Лысенко Л.Н., Бетанов В.В. Состояние и перспективы совершенствования орбитальных структур навигационных спутниковых систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 1. С. 3–18.
4. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов / под ред. Л.Н. Лысенко. Монография. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 518 с.
5. Федеральный радионавигационный план США // МТ и МО США. 2008.
6. Современные технологии навигации геостационарных спутников / Ю.М. Урличич, С.А. Ежов, А.И. Жодзишский, А.В. Круглов, Ю.Ю. Махненко. Монография. М.: Физматлит. 2006. 280 с.

## REFERENCES

- [1] Finkelstein A.M., Ipatov A.V., Skurikhina E.A. The fundamental coordinate and time support for the GLONASS system means RSDB-network Quasar-KVO. *Tr. IPA RAN* [Proc. of IAA RAS]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2007, vol. 77, no. 7, pp. 608–617 (in Russ.).
- [2] Lysenko L.N., Pankratov I.A. *Osnovy sputnikovoy navigatsii* [Fundamentals of satellite navigation]. Moscow, Voenizdat Publ., 1988. 176 p.
- [3] Stupak G.G., Lysenko L.N., Betanov V.V. Status and Perspective for Improving Orbital Structures of Navigation Satellite Systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2014, no. 1, pp. 3–18 (in Russ.).
- [4] Lysenko L.N., Betanov V.V., Zvyagin F.V. *Teoreticheskiye osnovy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniya kosmicheskikh poletov* [Theoretical Foundations of ballistics Navigation Support Space Missions]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2014. 518 p.
- [5] United States Federal Radionavigation Plan (FRP). Commerce Department and Department of Defense of USA, 2008.
- [6] Urlichich Yu.M., Yezhov S.A., Zhodzishsky A.I., Kruglov A.V., Makhnenko Yu.Yu. *Sovremennyye tekhnologii navigatsii geostatsionnykh sputnikov* [Modern technology navigation geostationary satellites]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 271 p.

Статья поступила в редакцию 19.05.2015

Лысенко Лев Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Lysenko L.N. — D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Dynamics, Ballistics and Flight Vehicles Movement Control, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Корянов Всеволод Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Koryanov V.V. — Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Dynamics, Ballistics and Flight Vehicles Movement Control, Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Топорков Алексей Геннадьевич — аспирант кафедры “Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Toporkov A.G. — Ph.D. student, Department of Dynamics, Ballistics and Flight Vehicles Movement Control, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Об оценке требований к точности спутниковой навигации на основе анализа современного состояния КВНО потребительских систем гражданского назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 5. С. 47–61.

**Please cite this article in English as:**

Lysenko L.N., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Evaluation of satellite navigation accuracy requirements based on the analysis of the current state of commercial coordinate and time navigation support systems. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 5, pp. 47–61.