

**Обоснование системообразующей роли
навигационно-баллистического обеспечения
при создании контура управления перспективными
космическими системами**

© С.В. Васьков, А.Н. Жуков, Ю.С. Васькова

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация
«Системы прецизионного приборостроения», Москва, 111024, Россия

Проанализированы базовые принципы организации управления перспективными КС на примере низкоорбитальных КС наблюдения, поскольку реализация амбициозных планов по созданию и развертыванию перспективных космических систем (КС) требует проведения скорейшей технологической модернизации наземного и орбитального сегментов управления, основанных на новых принципах. Рассмотрены особенности организации управления и применения по целевому назначению перспективных низкоорбитальных КС наблюдения в части навигационно-баллистического обеспечения управления. Показано, что в качестве системообразующего элемента управления для перспективных космических систем необходимо использовать систему высокоточного навигационно-баллистического обеспечения. Наивысшая точность навигации достигается только при использовании измерительной информации глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Но технология, основанная на интервальной обработке как измерительной информации наземных средств, так и кодовых измерений ГНСС, не обеспечивает требуемой точности навигации. Рассмотрен эффект использования при позиционировании КС фазовых измерений, ассистирующих данных систем функциональных дополнений, а также специальных технологий обработки информации. Приведены ключевые параметры математических моделей движения для КС на низких орбитах в части состава гармоник геопотенциала Земли, модели атмосферы, светового давления, учета гравитационного влияния планет. Представлен бюджет погрешностей систематических смещений при обработке кодовых и фазовых измерений навигационного приемника. Даны описания путей построения контура высокоточного навигационно-баллистического обеспечения и организации его информационно-логического взаимодействия.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, функциональные дополнения, высокоточная навигация, ассистирующие данные, апостериорная обработка, прецизионные измерения, математическая модель движения, математическая модель измерений, навигационно-баллистическое обеспечение, бортовые комплексы управления

Введение. В настоящее время центры управления полетами наземных комплексов управления (НКУ) космическими системами (КС) находятся на этапе технологической модернизации с целью реализации эффективного управления перспективными космическими системами. В первую очередь это связано с требованиями к КС нового поколения, способными непрерывно решать целевые глобальные задачи с высокой точностью. Типовые методы управления, обеспечи-

ваемые обладающими значительными возможностями НКУ, все же ограничены региональностью этих НКУ, и поэтому удовлетворять этим перспективным требованиям не в состоянии. Исходя из анализа современных тенденций можно выделить три базовых принципа организации управления новыми КС:

непрерывность, обеспечиваемая ретрансляционными высокоскоростными космическими каналами передачи данных;

автономная интеллектуализация бортовых комплексов управления (БКУ) перспективных КС, делегирование БКУ типовых операций управления с переводом НКУ в режим мониторинга и отработки особенно ответственных и нештатных ситуаций;

реализация координатно-временного обеспечения перспективных КС на основе навигационной информации ГЛОНАСС и ее функциональных дополнений.

Следовать этим принципам очень важно при организации управления низкоорбитальными КС наблюдения. Требования, предъявляемые к уровню решения задач наблюдения за наземными объектами, приведены в работах [1–3].

Наиболее существенно влияют на качество данных наблюдения и создают преимущество в обеспечении целевых характеристик КС бортовые средства специальной аппаратуры и наземные средства обработки информации. Их основными параметрами являются разрешающая способность бортовой аппаратуры наблюдения и точность координатной привязки объектов наблюдения, которая в свою очередь зависит от точности ориентации осей визирования на наблюдаемый объект и точности навигации космического аппарата (КА), которая реализуется бортовыми комплексами управления. Можно повысить эффективность наблюдения, прежде всего по оперативным данным, используя для решения этих задач информацию, получаемую с малогабаритных космических аппаратов (МКА).

Построение перспективных систем МКА на низких орбитах вызвано прежде всего наличием существенных ограничений на специальную аппаратуру. У них при высоте орбиты 250...350 км погрешность привязки осей визирования специальной аппаратуры (даже ее лучших современных образцов) в проекции на земную поверхность может составлять десятки метров. В этом случае бюджет погрешности навигации КА не превысит нескольких метров. Следовательно, точность навигации для перспективных орбитальных МКА наблюдения не будет выходить из беспрецедентно узких метрового и субметрового диапазонов. Следовательно, из всех требований, предъявляемых к системе в целом, эти можно считать наиболее важными.

Очевидно, что типовые контуры навигационно-баллистического обеспечения (НБО), использующие информацию, получаемую как от

наземных средств, так и путем прямых кодовых измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на ограниченных мерных интервалах, не в состоянии обеспечить подобные параметры.

Цель работы — исследовать проблемы создания контура НБО перспективных КС, способного обеспечить беспрецедентные требования к точности навигации, оценить влияние особенностей перспективной технологии НБО на схему управления перспективными КС в целом, а также проанализировать требования к информационным ресурсам НБО, а также к математическим моделям и методам обработки измерительной информации в НКУ и БКУ.

Материалы и методы создания высокоточного НБО перспективного контура управления КС. В соответствии с ограничениями, накладываемыми конструкцией МКА наблюдения и соответствующими целевыми задачами, навигационно-баллистическое обеспечение управления должно обладать следующими особенностями:

- орбитальные группировки МКА предполагается размещать исключительно на низких (преимущественно круговых) орбитах, на которых, с одной стороны, воздействует самый сложный для учета возмущающий фактор — верхняя атмосфера Земли, с другой — обеспечивается возможность непрерывной навигации по сигналам ГНСС;
- наличие в орбитальной группировке (ОГ) до нескольких десятков МКА, что требует существенного пересмотра технологии управления КА ограниченными средствами НКУ;
- включение в технологические циклы НБО управления МКА жестких оперативных требований к организации операций маневрирования (по поддержанию орбитальной структуры и орбитальных параметров каждого МКА).

При детальном рассмотрении этих особенностей следует признать, что все они связаны с точностью навигации МКА, если исходить из основного требования к целевым характеристикам ОГ МКА — точности координатной привязки объекта наблюдения.

Анализ современного состояния и перспектив развития глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, BeiDou, Galileo показал принципиальную возможность удовлетворения требований к точности навигации перспективных КС в случае использования измерительной информации при разном составе навигационных полей. Но невозможно обеспечить субметровую точность навигации в оперативном режиме при разных условиях космической обстановки, выполняя обработку в БКУ лишь прямых кодовых измерений даже всего состава навигационных полей ГНСС. Для повышения точности навигации в оперативном (и апостериорном) режиме необходимы дополнительные данные.

Очевидно, что наивысшей точности навигации можно достичь только с применением измерительной информации ГНСС. Целесообразно оценить эффект от использования измерений по фазе несущей частоты навигационных сигналов (фазовых измерений), ассистирующих данных систем функциональных дополнений [4–6], а также специальных технологий обработки информации в БКУ и НКУ, опираясь на международный опыт решения этой задачи в интересах наземного потребителя (например, системы Veripos, Omnistar). Поиск способов решения подобной задачи для отечественных орбитальных систем является крайне актуальным.

Для того чтобы определить высокоточные координаты потребителя ГНСС в абсолютном режиме на метровом уровне, необходимо выполнить три условия: использовать высокоточную эфемеридно-временную информацию вместо оперативной; включить в обработку фазовые измерения, имеющие погрешности; в процессе обработки навигационных данных компенсировать ряд систематических смещений в исходных измерениях.

Основными факторами, вызывающими погрешности при расчете истинной дальности, являются смещение показаний часов приемника и излучателя, тропосферная задержка сигнала, ионосферная задержка сигнала, а также целый ряд геодинамических и аппаратурных эффектов [4, 7, 8]. Для компенсации систематических погрешностей требуется применение в БКУ КС сложного математического аппарата и временного ресурса, прежде всего при разрешении неоднозначностей фазовых измерений [9].

Крайне важным для МКА на подобных орбитах является настройка прогнозирования параметров математических моделей движения (ММД) для эффективного планирования работы целевой аппаратуры. В баллистическом центре наземного автоматизированного комплекса управления и пункте метрологического контроля системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок ГНСС ГЛОНАСС были проведены статистические исследования этих параметров и сформулированы рекомендации по их применению. В частности, для низких орбит такого класса определено, что расчет торможения КА в атмосфере Земли следует выполнять с использованием динамических моделей расчета плотности атмосферы Земли (например, модели ДМА-2004), с учетом переменности баллистического коэффициента и фиксированного уровня солнечной активности. При этом необходимо проводить регулярное уточнение величины баллистического коэффициента. Для того чтобы согласовать математические модели движения, используемые в НАКУ и в БКУ, необходима периодическая передача программы разворотов КА, а также массивов гео- и гелиофизических параметров.

Кроме того, исследовано влияние отклонений ускорения свободного падения на точность прогнозирования в зависимости от разложения геопотенциала по сферическим функциям. За эталонное значение выбрано разложение геопотенциала по гармоникам 120×120 . Построены зависимости этих отклонений от состава гармоник разложения (рис. 1).

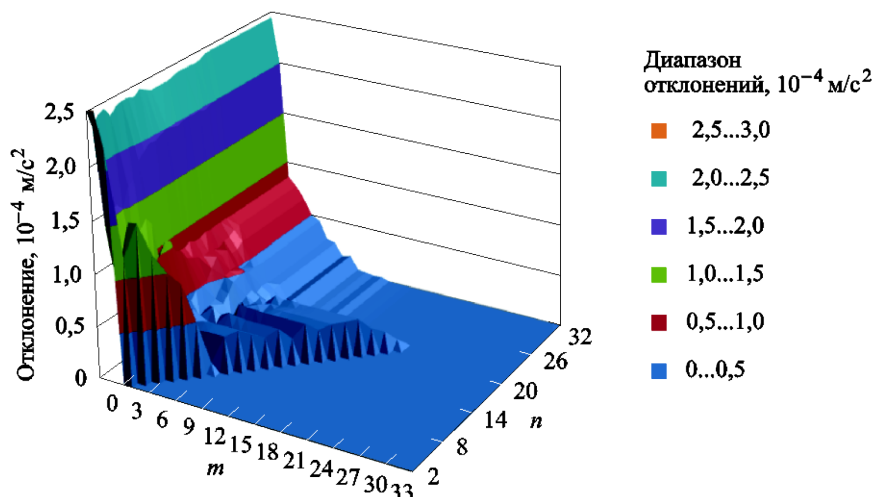


Рис. 1. Зависимость отклонений ускорения свободного падения от состава гармоник разложения геопотенциала для высоты 250 км:
 m — зональные гармоники; n — тессеральные гармоники

Для высот 250...1000 км выявлено нарастание отклонений до гармоник разложения порядка 24–32, далее отклонения изменяются крайне слабо. Кроме того, порядок значений отклонений становится меньше, чем порядок значений возмущений от атмосферы Земли (рис. 2). Расчет влияния аномалий гравитационного поля Земли на движение КА необходимо выполнять с учетом последней модели данных аномалий — «Параметры Земли 2011 года» (ПЗ-90.11).

Что касается влияния планет, для таких орбит достаточно ограничиться учетом гравитационного влияния Луны и Солнца. Расчет светового давления Солнца целесообразно проводить по номинальной модели прямого светового давления с периодическим уточнением коэффициента светового давления. Влиянием отраженного от Земли потока излучения Солнца, а также теплового излучения Земли можно пренебречь.

Измерения навигационного приемника и их математические модели. С помощью навигационного приемника выполняют измерения псевдодальностей, фазовые измерения и доплеровское смещение частот несущих колебаний спутниковых сигналов.

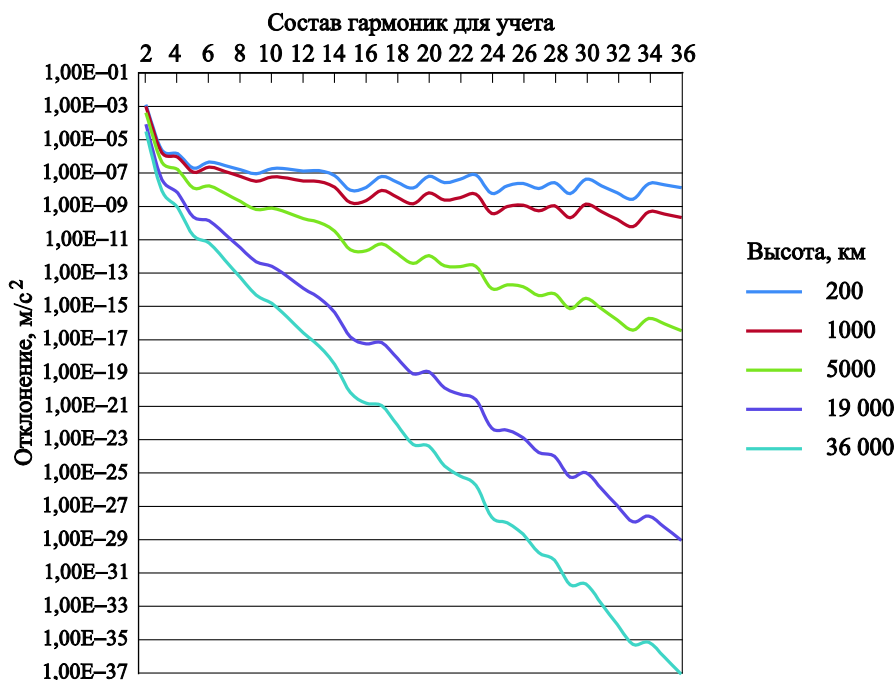


Рис. 2. Зависимость отклонений ускорения свободного падения от гармоник разложения геопотенциала для различных высот

Физическая природа и методы этих измерений изложены в работах [7, 8, 10]. Использование данных измерений для навигации основано на их математических моделях. В этих моделях описывается связь измерений с координатами приемника, показаниями его часов во время их проведения, координатами навигационного спутника и показаниями часов спутника на момент, предшествующий измерению во время распространения сигнала. Сложности использования результатов измерений при высокоточном местоопределении в абсолютном режиме вызваны систематическими погрешностями измерений. При местоопределении в абсолютном режиме с обычной точностью (несколько метров) большей частью факторов обычно пренебрегают в связи с незначительностью их влияния. В случае когда требуется повышенная точность местоопределения, такие упрощения недопустимы. Если исходить из требований к точности оперативной автономной навигации орбитального потребителя, разработчик системы может выбрать необходимый бюджет систематических погрешностей при обработке измерений, учитывая при этом вычислительные возможности БКУ. Данные бюджетов погрешностей представлены в таблице (НКА — навигационный космический аппарат).

Бюджет погрешностей систематических смещений при обработке измерений навигационного приемника

Причина погрешностей в измерениях	Внешние данные для компенсации погрешности	Бюджет погрешности
Неоднозначность и разрывы псевдофазовых измерений	Внешних данных не требуется	Неучет нескольких циклов — дециметры
Релятивистские и гравитационные эффекты		До метров
Взаимное расположение антенн НКА и приемника		Дециметры — метры
Задержка сигнала в ионосфере		Метры — десятки метров
Задержка сигнала в тропосфере	Метеорологические и географические параметры	То же
Смещение фазовых центров НКА	Данные о смещении фазовых центров НКА, приемника	Дециметры — метры
Смещение фазовых центров приемника		
Приливные эффекты (твердотельные, полярные, океанические, атмосферные, движение тектонических плит)	Смещение координат полюса, значения гармоник океанических приливных компонент, метеопараметры, угловые скорости вращения тектонических плит	Сантиметры — дециметры

Путем анализа математических моделей фазовых измерений навигационного приемника установлено, что ключевыми факторами при компенсации погрешностей по расчету истинной дальности являются смещение показаний часов приемника и спутника, тропосферная и ионосферная задержки сигнала и другие геодинимические и аппаратурные эффекты. Важнейший фактор — смещение показаний часов приемника. Компенсация целого ряда систематических погрешностей требует применения в БКУ сложного математического аппарата и временного ресурса, особенно при разрешении неоднозначностей фазовых измерений.

На этапе проектирования системы для реализации высокоточной навигации необходимо обосновать и предъявить требования к аппаратуре спутниковой навигации (АСН). Ниже приведен перечень этих требований.

Прежде всего, АСН должна быть выполнена на базе многодиапазонной бортовой навигационной аппаратуры для получения измерений текущих навигационных параметров движения КА по сигналам ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo, Beidou по всем видимым навигационным спутникам. Это необходимо для реализации режима мультисистемной навигации в оперативном автономном режиме и возможности расчета ассистирующих данных для различных составов ГНСС.

Необходимо обеспечить резервирование приемно-вычислительных устройств и выдачу измерительной информации с настраиваемым шагом (от 10 до 1 с).

АСН должна обеспечивать навигационные измерения, включая кодовые и фазовые, по каждому наблюдаемому навигационному спутнику, а также измерения линейной скорости навигационных спутников по линии их наблюдения (доплеровские измерения). Проводить измерение текущих навигационных параметров следует в двух поддиапазонах частот навигационных сигналов — как отдельно по ГНСС ГЛОНАСС, GPS, Galileo и Beidou [11], так и при их совместном использовании.

Дополнительно к антенному модулю АСН должны быть разработаны элементы, позволяющие максимально ослабить эффект многолучевости.

Количество каналов приема и обработки навигационных сигналов должно быть достаточным для измерений по всем радиовидимым навигационным спутникам (ГЛОНАСС, GPS, Galileo и Beidou).

Выдаваемая АСН измерительная информация не должна быть сглаженной и не должна содержать никаких поправок, кроме калибровочных.

Результаты измерений должны быть привязаны к непрерывной опорной шкале времени (ШВ). Формирование непрерывной опорной ШВ должно обеспечиваться с использованием высокостабильного генератора опорной частоты.

Измеренные параметры должны быть привязаны к целым секундам ШВ АСН. При выдаче измерений с шагом более 1 с привязка данных должна осуществляться к моментам времени, кратным шагу выдачи измерений.

Должна быть обеспечена непрерывность слежения за фазой несущей при проведении фазовых измерений, в том числе на интервалах выполнения динамических операций КА. На интервале видимости навигационного спутника должна исключаться возможность потерь слежения за фазой несущей («скачков»).

Необходимо обеспечить получение данных о фактических выносах фазовых центров антенн в зависимости от частоты и направления приема сигнала.

АСН должна обеспечивать определение (позиционирование) и выдачу навигационных параметров, включая:

- текущее время навигационного решения в шкале UTC;
- проекции радиус-вектора центра масс (ЦМ) в гринвичской системе координат (ПЗ-90.11);
- проекции вектора линейной скорости центра масс КА в гринвичской системе координат (ПЗ-90.11).

При решении задачи оперативной навигации должно обеспечиваться использование периодически уточняемых калибровочных данных ГЛОНАСС и самого КА.

Возможности оперативной навигации объектов по фазовым измерениям ограничиваются точностью эфемерид и параметров часов навигационных спутников. Точности эфемеридно-временной информации, транслируемой в составе навигационных сообщений, недостаточно, поэтому следует использовать более точную (сантиметрового уровня точности) апостериорную эфемеридно-временную информацию. В качестве источника высокоточных эфемерид и временных поправок в контуре высокоточного НБО следует предусмотреть применение Системы прецизионной навигации (СПН), создаваемой в настоящее время в интересах обслуживания специальных потребителей.

Именно высокая точность автономной навигации перспективных КС даст возможность решить ключевые вопросы, связанные с НБО ОГ большого состава и с обеспечением маневрирования МКА в части поддержания структуры ОГ и орбитальных параметров каждого МКА. Это преимущество перспективных МКА позволит реализовать многие задачи управления в БКУ и перевести НКУ в оперативный мониторинг состояния бортовых систем и точностных характеристик навигации с использованием прецизионных данных СПН. С помощью СПН можно снабжать БКУ необходимыми для высокоточной навигации данными в рамках сектора подготовки данных для БКУ КА (СПД БКУ КА), что позволит решить задачу с минимальными затратами.

Помимо ассистирующей информации, для реализации режима высокоточной навигации СПД БКУ КА должен заложить в БКУ следующие данные:

- рассчитанный по специальной методике состав ГНСС, обеспечивающий выполнение требований к точности навигации КС с использованием ассистирующей информации данного состава ГНСС;
- калибровочные данные АСН, которые следует учитывать при уточнении параметров движения в БКУ;
- данные модели расчета погрешности прогнозирования БКУ параметров движения ЦМ для режима высокоточной навигации методом прогнозирования на временном интервале, обеспечивающим лучшие точностные характеристики, чем при навигации по ГНСС (для компенсации временных интервалов нарушений в доставке ассистирующих данных в БКУ).

В БКУ перечисленные данные используются в разных условиях космической обстановки. При этом требования к точности навигации выполняются и при наличии условий для доставки ассистирующей информации, и при отсутствии такой возможности на временном

интервале в соответствии с данными модели расчета погрешности прогнозирования БКУ параметров движения ЦМ.

На рис. 3 представлена информационно-логическая схема высокоточного НБО (ВНБО).

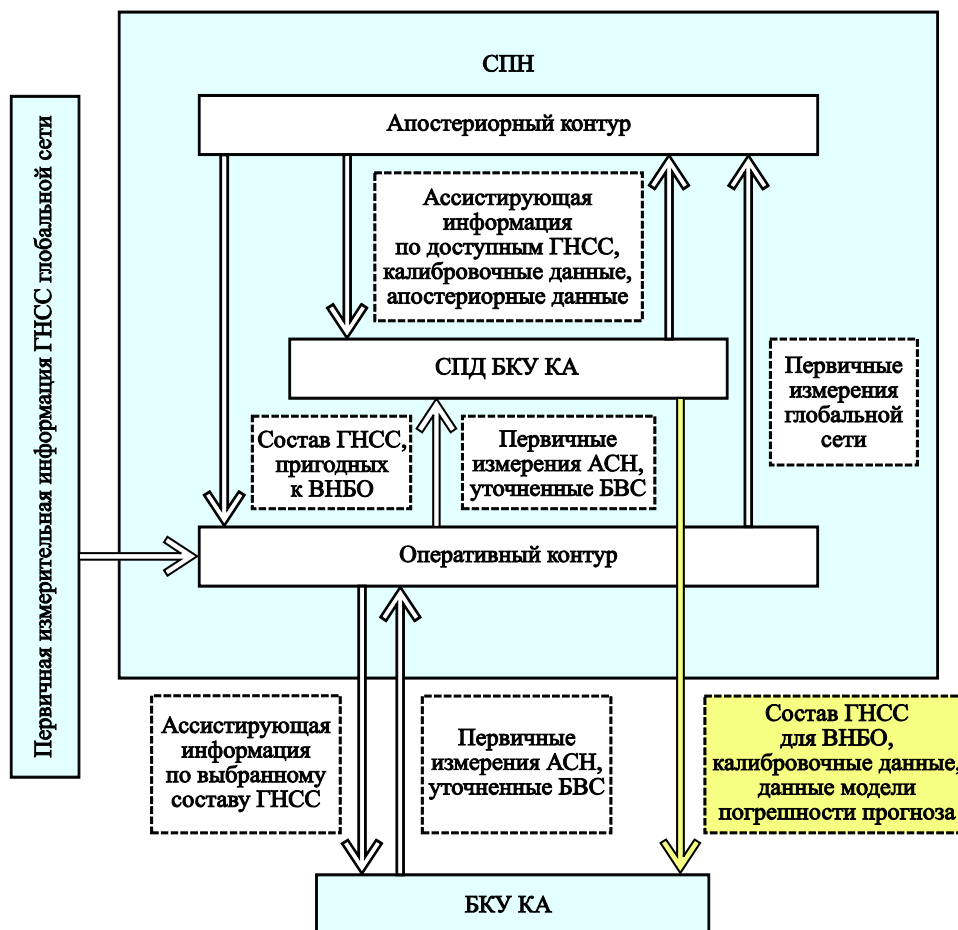


Рис. 3. Информационно-логическая схема высокоточного НБО КС:

БВС — бортовые векторы состояния

Заключение. При построении контура высокоточного НБО необходимо интенсивно использовать практически все ресурсы контура управления КС. Кроме того, следует учитывать требования к АСН и БКУ, что обуславливает изменение облика КА в целом. В НКУ должны быть предусмотрены новые функциональные элементы и разработаны новые информационные связи, прежде всего в СПН.

Контур высокоточного НБО надо рассматривать как основу КС, и проектирование перспективных КС следует начинать именно с него. В противном случае невозможно будет выполнить повышенные требования к точности навигации.

Для построения контура высокоточного НБО необходимо:

- создать высокоскоростные (в том числе космические) каналы передачи данных, обеспечивающие непрерывность доставки данных в БКУ;
- реализовать сложную структурно-функциональную схему наземной вычислительной инфраструктуры, интегрированной со всеми элементами КС;
- выдвинуть ряд требований к АСН и БКУ КС на этапе проектирования.

При этом требуется решить следующие задачи:

- перераспределить состав задач НКУ и БКУ (провести конфигурирование облика элементов), реализовать в БКУ высокоточную ММД КА, перевести БКУ КС в режим автономного (полуавтономного) функционирования;
- обеспечить *глобальное, непрерывное и устойчивое* взаимодействие орбитального сегмента и НКУ на основе ретрансляционных космических каналов связи;
- перевести НКУ в режим оперативного и апостериорного контроля за состоянием точностных характеристик автономной навигации КС;
- реализовать в БКУ модели и методы обработки кодовых и фазовых измерений;
- обеспечить удаленную калибровку АСН в СПН;
- обеспечить мультисистемную оперативную навигацию по сигналам ГНСС при использовании ассистирующих данных и данных СПН по мониторингу точностных характеристик ГНСС для оценки возможности использования указанных данных;
- обеспечить оперативную навигацию КС путем высокоточного прогнозирования при временной невозможности использования ассистирующих данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Болсуновский М.А., Дворкин Б.А. Развитие систем ДЗЗ и информационно-аналитического обеспечения данными космической съемки. *Геоматика*, 2010, № 4, с. 11–16.
- [2] Василевский В.В. Сравнительный анализ эффективности разнотипных систем дистанционного зондирования Земли. *Космонавтика и ракетостроение*, 2009, № 3 (56), с. 147–151.
- [3] Замшин В.В. Методы определения линейной разрешающей способности оптических и радиолокационных аэрокосмических изображений. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2014, № 1, с. 43–51.
- [4] Zhang X., Guo F., Zhou P. Improved Precise Point Positioning in the presence of ionospheric scintillation. *GPS Solutions*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 51–60.

- [5] Пасынков В.В., Ревнивых С.Г., Шаргородский В.Д. Система высокоточного позиционирования на базе технологий А-GNSS с использованием высокоточной эфемеридно-временной информации. Труды Ин-та прикладной астрономии РАН. Вып. 20: матер. 3-й Всерос. конф. «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО-2009): Санкт-Петербург, 6–9 апреля 2009 г.», ИПА РАН. 2009, с. 156–157.
- [6] Брагинец В.Ф., Жуков А.Н., Пасынков В.В., Федотов А.А. Проблемные вопросы глобального высокоточного координатно-временного обеспечения потребителей в реальном масштабе времени. Труды Института прикладной астрономии РАН, 2015, № 35, с. 53–59.
- [7] Leandro R.F. Precise Point Positioning with GPS: A New Approach for Positioning, Atmospheric Studies, and Signal Analysis. *Geodesy and Geomatics Engineering*. Technical report. no. 267. New Brunswick, Canada, University of New Brunswick, 2009, 232 p.
- [8] Bahrami M., Ziebart M. GNSS Geodetic Reference Frames: Consistency, Stability and the Related Transformation Parameters. *Proc. 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+2011)*. Portland, Oregon, 2011, pp. 2318–2331.
- [9] Подкорытов А.Н. Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений. *Вестник Московского авиационного института*, 2012, т. 10, № 10, с. 45–51.
- [10] Aggrey J., Bisnath S. Analysis and Modelling of Pseudorange and Carrier-Phase Biases in GNSS Precise Point Positioning. *Proc. 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+2014)*. Tampa, Florida, 2014, pp. 2512–2522.
- [11] Tegeedor J., Lapucha D., Orpen O., Vigen E., Melgård T., Strandli R. The New G4 Service: Multi-constellation Precise Point Positioning Including GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Proc. 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+2015)*. 2015, pp. 1089–1095.

Статья поступила в редакцию 17.12.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Васьков С.В., Жуков А.Н., Васькова Ю.С. Обоснование системообразующей роли навигационно-баллистического обеспечения при создании контура управления перспективными космическими системами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-2-1849>

Васьков Сергей Владимирович — канд. техн. наук, начальник сектора акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 20 работ в области космической баллистики. e-mail: sergvasserg@yandex.ru

Жуков Александр Николаевич — канд. техн. наук, директор филиала «Прецизионное навигационно-баллистическое обеспечение» акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». Автор более 50 работ в области космической баллистики. e-mail: zhukov@spnav.ru

Васькова Юлия Сергеевна — инженер акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». Автор трех работ в области космической баллистики. e-mail: vaskovasveta@yandex.ru

Justification of the backbone role of navigation and ballistic support in developing a control loop for advanced space systems

© S.V. Vaskov, A.N. Zhukov, Yu.S. Vaskova

Open JSC Scientific and Production Corporation of Precision Instruments Engineering,
Moscow, 111024, Russia

The implementation of ambitious plans for the creation and deployment of advanced space systems (SS) requires the early technological modernization based on new principles of ground and orbital control segments. The article analyzes the basic principles of organizing the control of prospective SS based on the study of new quality requirements for them. These principles are manifested most comprehensively and vividly in the organization of the promising low-orbit observing SS control. The features of the organization of control and the application of mission-oriented advanced low-orbit observing SS in terms of navigation and ballistic control support are considered. The substantiation of the need for using a high-precision navigation and ballistic support (NBS) system as a backbone control element for advanced space systems is made. Obviously, the best navigation accuracy can be obtained only using the GNSS measurement information. However, the implementation of navigation technology based on interval processing of both ground-based measuring information and GNSS code measurements is not sufficient to meet the requirements. In this regard, it is proposed to assess the effect of using phase measurements, systems of functional additions assisting data, as well as special information processing technologies in the positioning of SS. The substantiation of the optimal parameter composition of mathematical models of motion for the SS in low orbits in terms of the composition of the Earth's geopotential harmonics, atmospheric model, light pressure, taking into account the gravitational effect of the planets was carried out. The budget for systematic offset errors in the processing of code and phase measurements of the navigation receiver, which can be used with varying requirements for navigation accuracy, is described. The ways of building the high-precision navigation-ballistic support loop and organization of its information-logical interaction are revealed.

Keywords: *GLONASS, functional additions, high-precision navigation, assisting data, a posteriori processing, precision measurements, mathematical model of motion, mathematical model of measurements, navigation and ballistic support, onboard control complexes*

REFERENCES

- [1] Bolsunovsky M.A., Dvorkin B.A. *Geomatika — Geomatics*, 2010, no. 4, pp. 11–16.
- [2] Vasilevsky V.V. *Kosmonavtika i raketostroenie — Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2009, no. 3 (56), pp. 147–151.
- [3] Zamshin V.V. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodezia i aerofotosyemka — Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geodesy and aerophotosurveying*, 2014, no. 1, pp. 43–51.
- [4] Zhang X., Guo F., Zhou P. *GPS Solutions*, 2014, vol. 18, no. 1, pp. 51–60.
- [5] Pasyukov V.V., Revniviykh S.G., Shargorodsky V.D. Sistema vysokotochnogo pozitsionirovaniya na baze tekhnologiy A-GNSS s ispolzovaniem vysokotochnoy efemeridno-vremennoy informatsii [The system of high accuracy positioning based on the A-GNSS technique using high-precision ephemeris and

- time information]. *Trudy 3 Vserossiyskoy konferentsii "Fundamentalnoe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie 'KVNO-2009' "* [Proceedings of the 3rd All-Russian conference "Fundamental and applied coordinate-temporal and navigation support 'KVNO-2009' "]. St. Petersburg, 2009, pp. 156–157.
- [6] Braginets V.F., Zhukov A.N., Pasyukov V.V., Fedotov A.A. *Trudy Instituta prikladnoy astronomii RAN — Transactions of the Institute of Applied Astronomy RAS*, 2015, no. 35, pp. 53–59.
- [7] Leandro R.F. Precise Point Positioning with GPS. A new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis. *Geodesy and Geomatics Engineering*. Technical report no. 267, New Brunswick, Canada, University of New Brunswick, 2009, 232 p.
- [8] Bahrami M., Ziebart M. GNSS Geodetic Reference Frames: Consistency, Stability and the Related Transformation Parameters. *Proc. 24th Int. Techn. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (ION GNSS 2011)*. Portland, Oregon, 2011, pp. 2318–2331.
- [9] Podkorytov A.N. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 10, no. 10, pp. 45–51.
- [10] Aggrey J., Bisnath S. Analysis and Modelling OF Pseudorange and Carrier-Phase Biases in GNSS Precise Point Positioning. *Proc. 27th Int. Techn. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (ION GNSS+2014)*. Tampa, Florida, 2014, pp. 2512–2522.
- [11] Tegedor J., Rpen O., Vigen E., Melgard T., Strandli R., Lapucha D. The new G4 Service: Multi-Constellation Precise Point Positioning Including GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Proc. 28th Int. Techn. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (ION GNSS+2015)*. Tampa, Florida, 2015, pp. 1089–1095.

Vaskov S.V., Cand. Sc. (Eng.), Head of the division, Open JSC Scientific and Production Corporation of Precision Instruments Engineering. Author of over 20 research publications in the field of space ballistics. e-mail: sergvasserg@yandex.ru

Zhukov A.N., Cand. Sc. (Eng.), Director, Branch of the Open JSC Scientific and Production Corporation of Precision Instruments Engineering. Author of over 50 research publications in the field of space ballistics. e-mail: zhukov@spnav.ru

Vaskova Yu.S., Engineer, Open JSC Scientific and Production Corporation of Precision Instruments Engineering. Author of 3 research publications in the field of space ballistics.