

Р. Н. АХМЕТОВ, Г. П. АНШАКОВ, А. И. МАНТУРОВ, В. И. РУБЛЕВ

РЕШЕНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ СИСТЕМОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «РЕСУРС-П»

Важнейшие свойства спутниковой навигации, такие как глобальность и малая зависимость от погодных условий, возможность проведения измерений в любой точке Земли и околоземного пространства, позволяют успешно использовать ее в контуре управления космическим аппаратом (КА) наблюдения и для обеспечения его автономного функционирования. Рассматриваются вопросы состава, построения и оценки точности навигации КА при использовании сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: навигационное обеспечение, бортовой комплекс управления, система спутниковой навигации

Введение

Решение задач, выполняемых современными КА наблюдения, существенным образом зависит от точности используемой навигационной информации, которая влияет на:

- точность формирования и отработки на борту аппаратов программ управления движением в обеспечение выполнения требований по решению задач наблюдения;

Ахметов Равиль Нургалиевич. Доктор технических наук, генеральный конструктор ОАО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Аншаков Геннадий Петрович. Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, зам. генерального конструктора ОАО «Ракетно-космический центр «Прогресс»; Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Мантуров Александр Иванович. Доктор технических наук, профессор, начальник отдела ОАО «Ракетно-космический центр «Прогресс». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Рублев Валерий Иванович. Заместитель начальника отдела ОАО «Ракетно-космический центр «Прогресс».

Статья по докладу на XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

- точность определения характеристик, используемых для обеспечения необходимого качества получаемых снимков земной поверхности.

Эксплуатация космических аппаратов наблюдения предполагает применение в бортовых комплексах управления навигационной информации, получаемой как бортовыми, так и наземными средствами.

Разработка и создание КА наблюдения связывается с применением систем автономной навигации, как перспективным направлением развития систем управления аппаратами. На аппаратах первого поколения, созданных в 1970–1980 годах, использовались разработанные ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара) астрорадиотехнические системы навигации [1, 10]. Эти системы сыграли важную роль в повышении показателей эффективности КА по сравнению с аппаратами, для которых навигационная информация получалась наземными средствами.

Однако уже в 80-х годах с началом развертывания глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [3] стали проводиться проектные разработки по созданию систем спутниковой навигации (СН). Система спутниковой навигации бортового комплекса управления (БКУ) КА «Ресурс-ДК1», запущенного в 2006 году и успешно эксплуатируемого в настоящее время, позволяет обеспечивать автоматическое снабжение навигационной информацией процесс управления аппаратом [2, 4, 5].

30 сентября 2013 г. после завершения летно-конструкторских испытаний введен в штатную эксплуатацию космический аппарат «Ресурс-П» разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара), который предназначен для высокодетального, детального широкополосного и гиперспектрального оптико-электронного наблюдения поверхности Земли. Для обеспечения решения целевых задач аппарата в составе БКУ используется система спутниковой навигации, которая является основным источником получения навигационной информации для бортового и наземного контуров управления КА, а также для комплекса обработки получаемой целевой информации.

Точностные характеристики системы спутниковой навигации зависят от точности навигационного поля системы ГЛОНАСС, геометрии сеанса навигационных определений, аппаратурных погрешностей приемника радионавигационных сигналов, погрешностей используемой в БКУ бортовой модели движения центра масс. Для уменьшения влияния перечисленных выше факторов снижения точности получения навигационной информации в СН предусматривается статистическая обработка (фильтрация) результатов одномоментных навигационных определений (ОНО).

Функциональные задачи системы

К решению навигационной задачи системой навигации в БКУ предъявляются специальные условия:

- обеспечение потребителей в БКУ навигационной информацией должно быть непрерывным и не зависеть от режима поступления измерений в систему навигации;
- логика работы системы должна отвечать заданной точности;
- для обеспечения потребителей навигационной информацией на временных промежутках без навигационных измерений используются необходимые модели движения центра масс КА для прогнозирования параметров движе-

ния;

- формирование в составе контрольной информации необходимого количества получаемой в ССН информации для последующей передачи в наземный комплекс управления (НКУ).

Перечисленные условия определяют специфику требований, предъявляемых к решению навигационной задачи в БКУ, и выбора алгоритмического состава программного обеспечения.

При выборе алгоритмического и программного обеспечения (ПО) ССН учитываются возможности бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ).

В качестве измерительной информации в системе навигации используются измерения дальности D и относительной скорости КА \dot{D} по отношению к навигационным спутникам ГНСС.

Общая схема решения навигационной задачи системой предполагает реализацию следующих основных задач:

- получение измерений D_i и \dot{D}_i на некоторый момент времени t ;
- определение на момент времени t параметров движения \bar{r}, \bar{v} ;
- определение параметров движения по результатам статистической обработки совокупности одномоментных навигационных измерений на некотором интервале времени.

В навигационной аппаратуре системы проводятся измерения навигационных параметров (псевдодальности и псевдоскорости) для отдельных навигационных спутников (НС) и определяется местоположение и скорость КА. Использование ОНО осуществляется с учетом необходимости защиты от использования недостоверной информации о параметрах движения при возможных сбоях в работе измерительной аппаратуры.

В результате совместной обработки ОНО на участке орбитального полета с использованием модели движения КА на орбите в ПО ССН формируется навигационная оценка параметров движения центра масс (ПДЦМ) с ошибкой значительно меньшего уровня. Кроме того, использование протяженного мерного интервала модели движения в алгоритме обработки ОНО обуславливает возникновение корреляционных зависимостей в векторе ошибок навигационной оценки, позволяющих уточнить период орбиты.

Структурное построение системы

В качестве навигационной аппаратуры на КА типа «Ресурс» используется бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство (БСКВУ), разработанное ОАО «РИРВ» по техническому заданию ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и решающее функциональные задачи по проведению измерений D_i, \dot{D}_i и получению результатов одномоментных навигационных измерений [5, 6].

Программно-алгоритмическое обеспечение ССН реализует следующие функциональные задачи:

- организация взаимодействия алгоритмов ПО ССН по получению навигационной информации (периодическое включение программ ССН для выдачи ПДЦМ КА в БКУ и формирования контрольной информации о работе ССН);
- управление БСКВУ в предусмотренных режимах работы: съема шкалы вре-

мени БСКВУ, съёма навигационной информации ОНО и контроля работоспособности БСКВУ;

- определение ПДЦМ КА с использованием метода динамической фильтрации;
- формирование массивов навигационной и контрольной информации, выдача их в зоны информационного оперативного контроля и программной телеметрической информации для контроля функционирования ССН, оценки характеристик ССН и использования в НКУ;
- прогнозирование ПДЦМ КА на необходимый момент времени.

Структурная схема алгоритмического обеспечения ССН приведена на рис. 1.

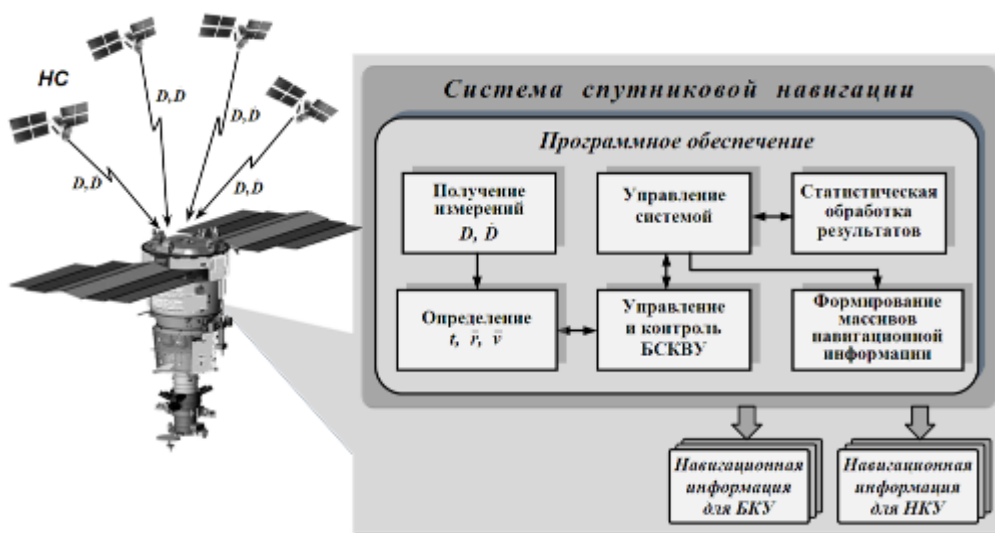


Рис. 1. Структурная схема алгоритмического обеспечения системы

Исходя из требований, предъявляемых к точности навигационного обеспечения на КА «Ресурс-ДК1», реализована система спутниковой навигации со следующими особенностями:

- в качестве навигационной аппаратуры использовано одночастотное 16-канальное БСКВУ, работающее по радионавигационным сигналам стандартной точности навигационных систем ГЛОНАСС и GPS, при этом отсутствует возможность проведения навигационных измерений по НС с отрицательными литерами частот, а также возможность устранения ионосферной составляющей погрешностей ОНО;
- в программном обеспечении проводится статистическая обработка результатов ОНО на интервале от 20 до 120 мин (периодичность обновления навигационной информации в БКУ 20 мин) с периодичностью поступления первичной навигационной информации из БСКВУ 2 мин (дальнейшее уменьшение дискретности не приводит к существенному повышению точности);
- в системе используется модель движения центра масс КА, учитывающая 4 гармоники гравитационного потенциала Земли (ГПЗ).

С учетом повышенных требований, предъявляемых к КА наблюдения и его навигационной системе, а также уровня развития спутниковых систем и навигационной аппаратуры создана усовершенствованная система спутниковой навигации КА «Ресурс-П». Для обеспечения выполнения предъявленных на КА

«Ресурс-П» требований к ССН по точности определения параметров движения были реализованы следующие технические решения:

- навигационные алгоритмы ССН, реализованные с учетом соотношения требований по точности прогнозирования параметров движения в БКУ и требований по точности ОНО к БСКВУ, позволили повысить точностные характеристики параметров движения не только на момент определения, но и при прогнозировании параметров движения. Были уменьшены интервалы обработки измерительной информации и использована более точная модель движения центра масс КА в БКУ;
- применение модифицированной двухчастотной 36-канальной навигационной аппаратуры БСКВУ (в том числе для компенсации ионосферных ошибок), принимающей радионавигационные сигналы повышенной точности навигационной системы ГЛОНАСС и стандартной точности системы GPS, что позволяет обрабатывать сигналы от 18 НС ГЛОНАСС или 12 НС ГЛОНАСС и 12 НС GPS одновременно.

Алгоритм фильтрации одномоментных навигационных определений

Для уточнения параметров движения по измерениям на некотором интервале времени, как показано на рис. 1, используются D_i , \dot{D}_i и одномоментные навигационные определения от БСКВУ. Необходимость обеспечивать бортовой комплекс управления навигационной информацией в режиме непосредственного управления функционированием КА, наличие погрешностей в одномоментных навигационных определениях, дискретность поступления измерений в систему, а также вычислительные возможности БКУ определяют выбор навигационного алгоритма. Указанным требованиям соответствует динамический линейный алгоритм фильтрации, адаптируемый к вычислительным возможностям бортовой вычислительной машины.

При обработке одномоментных навигационных определений для фильтрации случайных ошибок применяется метод динамической фильтрации с использованием фильтра Калмана. Фильтр Калмана, реализованный в ССН в скалярной форме с расчетом матрицы перехода по аналитическим формулам, является линейным рекуррентным динамическим дискретным фильтром, работающим по выборке нарастающего объема. При этом хранение всей выборки информации не требуется, достаточно хранить информацию о состоянии системы и получать текущий вектор ПДЦМ.

Процесс фильтрации ОНО делится на две фазы: экстраполяцию и уточнение. Во время экстраполяции фильтр получает предварительную оценку состояния системы на текущий шаг по итоговой оценке состояния с предыдущего шага (эту оценку назовем априорной оценкой состояния, так как для ее получения не используются наблюдения текущего шага). На этой стадии производятся экстраполяция ковариационной матрицы и прогнозирование вектора ПДЦМ с предыдущего момента времени на текущий момент.

В начальный момент времени формируется начальная ковариационная матрица $K_{\bar{q}_0}$, на диагональных элементах которой располагаются среднеквадратические погрешности отклонения σ_j^2 векторов ПДЦМ, получаемых из БСКВУ.

Ковариационная матрица K_q – матрица ковариаций среднеквадратических отклонений, характеризующих точность оценки вектора ПДЦМ размерностью 6×6 .

Фильтр Калмана реализован в скалярной форме [11] с последовательным уточнением в каждый i -й момент времени априорного вектора параметров движения центра масс КА $\bar{q}(t_i) = (x, y, z, V_x, V_y, V_z)^T$ по невязкам j -х компонент этого вектора ($j = 1, \dots, 6$) и соответствующих компонент измеренного вектора $\bar{q}^u(t_i)$. При этом для цикла $j=1$ в качестве начальной оценки используется вектор $\bar{q}^{ym}(t_i)$, полученный прогнозированием вектора ПДЦМ $\bar{q}^{ym}(t_{i-1})$ на момент времени t_i .

Прогнозирование вектора ПДЦМ производится по следующей формуле:

$$\bar{q}^{ym}(t_i) = L(\bar{q}^{ym}(t_{i-1}), t_i),$$

где L – оператор прогнозирования с использованием бортовой модели движения вектора ПДЦМ на заданный момент времени.

Последовательное уточнение вектора $\bar{q}(t_i)$ по j -й компоненте вектора измерений на момент времени t_i проводится по следующим формулам.

Вычисляется весовой вектор P_j (коэффициент усиления)

$$P_j = \frac{W_j}{\sigma_{jj}^2 + \sigma_j^2},$$

где σ_{jj}^2 – j -й диагональный элемент ковариационной матрицы $K_{\bar{q}_{j-1}}$ ошибок оценок (при $j > 1$), полученных в результате обработки компонент вектора измерений с 1-го по $(j-1)$ -й, или ошибок экстраполяции (при $j = 1$); σ_j^2 – j -й диагональный элемент ковариационной матрицы погрешностей измерений K_q^u ; W_j – j -й столбец матрицы $K_{q_{j-1}}$.

Физический смысл весового вектора P_j состоит в следующем: на первых итерациях фильтр Калмана «доверяет» измеренной информации, а при длительной работе большее «доверие» он оказывает уточненному вектору и становится менее чувствительным к погрешностям измеренных векторов.

Вычисляется вектор поправок ПДЦМ $\Delta \bar{q}_j$

$$\Delta \bar{q}_j = P_j \cdot (\bar{q}_j^u - \bar{q}_{j-1,j}^{ym}),$$

где \bar{q}_j^u – j -й элемент измеренного вектора \bar{q}^u , $\bar{q}_{j-1,j}^{ym}$ – j -й элемент уточняемого вектора \bar{q}_{j-1}^{ym} , полученного на предыдущей $(j-1)$ -й итерации либо по результатам экстраполяции (при $j=1$).

Уточняется вектор \bar{q}

$$\bar{q}_j^{ym}(t_i) = \bar{q}_{j-1}^{ym}(t_i) + \Delta \bar{q}_j.$$

Ковариационная матрица $K_{\bar{q}}$ уточняется по формуле

$$K_{\bar{q}_j} = K_{\bar{q}_{j-1}} - P_j \cdot W_j^T.$$

$K_{\bar{q}_j}$ – ковариационная матрица погрешностей параметров движения центра масс КА, уточненная по j -й компоненте вектора измерений.

Экстраполяция ковариационной матрицы с момента времени t_{i-1} на момент t_i осуществляется с использованием матрицы перехода $\Phi_{i,i-1}$ по следующей формуле

$$K_{\bar{q}}(t_i) = \Phi_{i,i-1} \cdot K_{\bar{q}}(t_{i-1}) \cdot \Phi_{i,i-1}^T.$$

Достоинствами реализованного алгоритма фильтрации являются:

- 1) удобство и возможность практической реализации на БЦВМ;
- 2) периодическое получение вектора ПДЦМ, удовлетворяющего предъявляемым требованиям по точности, в процессе обработки измерений;
- 3) формирование вектора ПДЦМ КА по мере поступления измеренной информации (не требуется хранение всей выборки);
- 4) отбраковка измерений, не прошедших проверку на нахождение в интервале допустимых значений;
- 5) возможность модификации реализованного метода (например, расчет матрицы баллистических производных не аналитическим, а численным способом, учет геометрического фактора в ковариационной матрице погрешностей ОНО).

Возможная расходимость фильтра устраняется ограничением интервала фильтрации.

В процессе выбора варианта реализации фильтра Калмана для статистической обработки (фильтрации) результатов ОНО и логики работы ССН было проведено имитационное математическое моделирование решения навигационной задачи для различных вариантов исходных данных:

- длительности интервала обработки;
- периодичности обработки;
- моделей движения центра масс КА (4, 8, 16 гармоник ГПЗ) [12];
- методов расчета матрицы перехода (численный, аналитический).

В качестве эталонной орбиты использовалась орбита, рассчитываемая с учетом 36 гармоник ГПЗ.

Зависимость погрешности определения положения центра масс КА «Ресурс-П» в радиальном направлении от интервала статистической обработки при использовании бортовой модели движения, учитывающей 8 гармоник ГПЗ, приведена на рис. 2. Здесь и далее погрешность понимается в смысле среднеквадратических отклонений (СКО).

Под модельными понимаются погрешности, обусловленные неполнотой учёта гармоник ГПЗ в бортовой модели движения. Под аппаратными понимаются погрешности, обусловленные погрешностями одномоментных навигационных определений в БСКВУ. Под «суммарными» понимаются погрешности, обусловленные погрешностями одномоментных навигационных определений в БСКВУ и неполнотой учёта гармоник ГПЗ в бортовой модели движения, что соответствует корню квадратному из суммы квадратов составляющих.

Зависимость погрешности прогнозирования положения центра масс КА «Ресурс-П» в радиальном направлении на интервале одного витка полёта КА от интервала обработки при использовании бортовой модели движения, учитывающей 8 гармоник ГПЗ, приведена на рис. 3.

Увеличение погрешностей определения на интервале более 40 мин обусловлено погрешностями неучёта гармоник ГПЗ от 8 до 36.

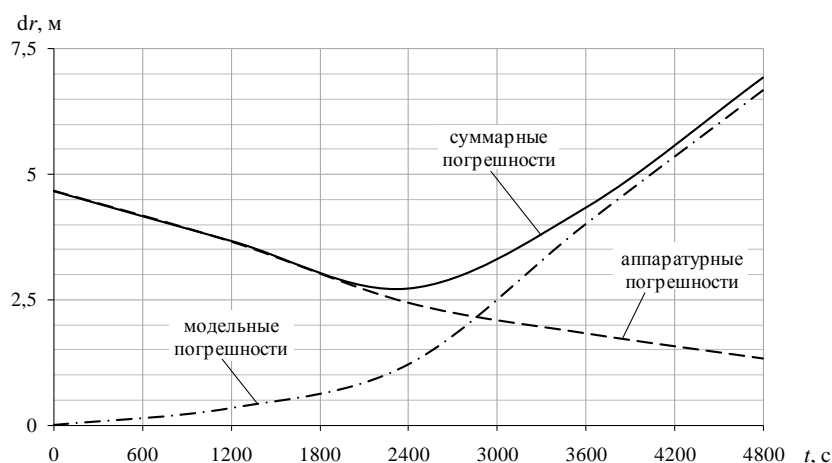


Рис. 2. Зависимость погрешности положения КА в радиальном направлении от интервала обработки (модель движения учитывает 8 гармоник ГПЗ)

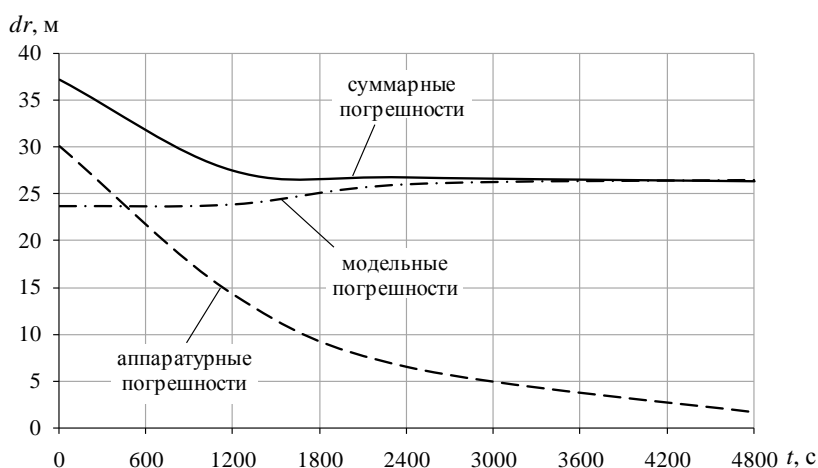


Рис. 3. Зависимость погрешности прогнозирования в радиальном направлении на интервале одного витка полёта КА от интервала обработки (модель движения учитывает 8 гармоник ГПЗ)

В целях рассмотрения перспективы дальнейшего повышения точностных характеристик ССН на рис. 4 приведена зависимость погрешности определения по радиусу на уровне СКО от интервала статистической обработки при использовании бортовой модели движения, учитывающей 16 гармоник ГПЗ.

На рис. 5 приведены зависимости погрешности прогнозирования по радиусу на уровне СКО на интервале одного витка полёта КА для интервала обработки 40 мин при использовании бортовой модели движения центра масс КА, учитывающей 4, 8, 16 гармоник ГПЗ.

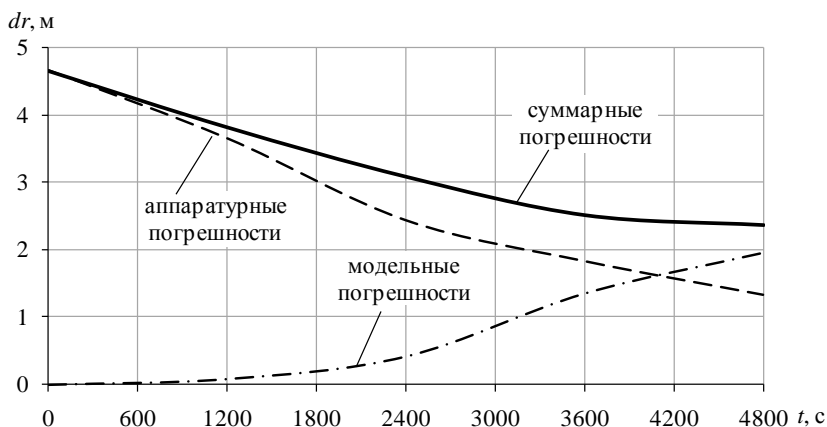


Рис. 4. Зависимость погрешности определения в радиальном направлении от интервала обработки (модель движения учитывает 16 гармоник ГПЗ)

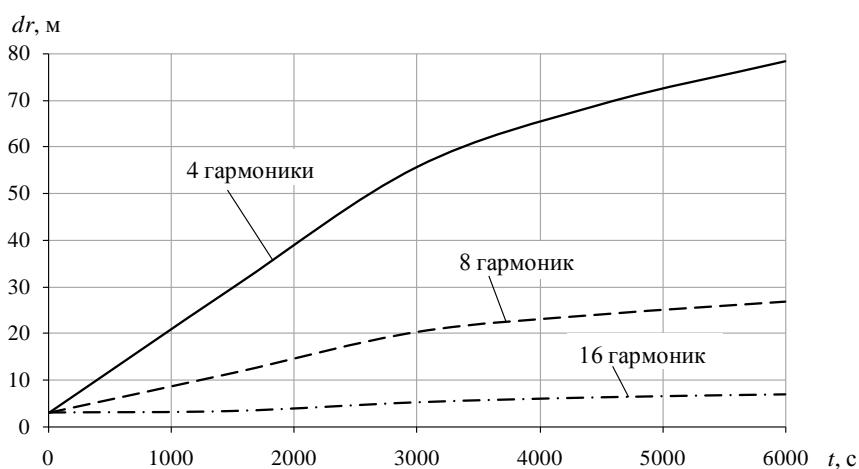


Рис. 5. Зависимость погрешности прогнозирования в радиальном направлении от интервала прогнозирования для различных бортовых моделей движения

Из анализа зависимостей, приведенных на рис. 2–5, можно сделать следующие выводы:

- погрешности определения положения центра масс КА минимальны при фильтрации результатов ОНО на интервале ~40 мин (см. рис. 2);
- предложенный алгоритм статистической обработки позволяет минимизировать влияние аппаратных погрешностей ОНО при использовании в системе интервала обработки от 20 до 40 мин (8 гармоник ГПЗ) и от 40 до 80 мин (16 гармоник ГПЗ) (см. рис. 2–4);
- дальнейшая перспектива повышения точностных характеристик ССН связана, в частности, с реализацией в БКУ модели движения центра масс аппарата, учитывающей большее количество гармоник ГПЗ (см. рис. 4 и 5) и учёта в модели движения КА притяжения Луны и Солнца (на рис. 4 и 5 приведены результаты без учёта Луны и Солнца в бортовой и эталонной моделях движения).

ческого моделирования решения навигационной задачи предполагалось, что погрешности ОНО имеют сильнокоррелированный характер на некотором временном интервале. Наличие сильнокоррелированных погрешностей ОНО практически не сказывается на точности определения параметров движения при периодичности обработки от 2 до 10 мин, что подтверждается результатами моделирования процесса фильтрации ОНО на КА «Ресурс-ДК». На рис. 6 приведены погрешности определения параметров движения по радиусу на интервале обработки 100 мин для различных дискретностей обработки ОНО (по результатам их определения на витке 7289). Аналогичные результаты получены для КА «Ресурс-П».

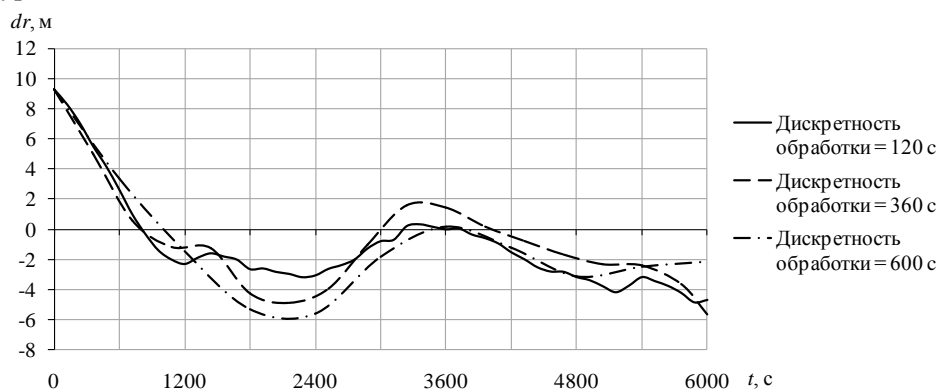


Рис. 6. Погрешности определения параметров движения в радиальном направлении для дискретностей обработки ОНО 120 с, 360 с, 600 с

С учетом минимизации временных затрат на проведение вычислительного процесса в бортовой вычислительной системе КА в алгоритме фильтрации расчет матрицы баллистических производных реализуется по аналитическим формулам в гринвичской невращающейся системе координат, что позволяет в несколько раз сократить время расчета матриц.

Результаты функционирования системы на этапе летных испытаний

Система спутниковой навигации начала свою работу 25 июня 2013 года на орбите выведения КА «Ресурс-П» с параметрами:

наклонение орбиты.....97,28°
 минимальная высота орбиты260 км
 максимальная высота орбиты.....476 км

Включение БСКВУ осуществлено в режиме работы по системам ГЛОНАСС и GPS.

С 29 июня 2013 года КА «Ресурс-П» переведён на рабочую орбиту с параметрами:

наклонение орбиты.....97,28°
 минимальная высота орбиты468 км
 максимальная высота орбиты.....487 км

Функционирование ССН осуществлялось по системам ГЛОНАСС и GPS в период с 25 июня по 4 июля и с 16 по 30 июля 2013 г., по системе ГЛОНАСС – в период с 4 по 16 июля и с 30 июля 2013 г. по настоящее время.

Для подтверждения выполнения требований к системе и проектных (априорных) характеристик ССН на этапе летных испытаний КА «Ресурс-П» проведена оценка точности ССН с использованием разработанной методики оценки точностных характеристик системы. Методика основана на получении характеристик погрешностей определения и прогнозирования положения и скорости КА по результатам сравнения с эталонной орбитой [2, 9].

Эталонная орбита определялась по результатам обработки навигационной информации в составе информации оперативного контроля и программной телеметрической информации на интервале нескольких витков полета КА с периодичностью 0,5 витка. Параметры эталонной орбиты определялись на наземных вычислительных средствах по методу наименьших квадратов с использованием высокоточной модели движения центра масс КА, учитывающей 36 гармоник ГПЗ.

Оценка точностных характеристик системы проведена для вариантов использования радионавигационного поля системы ГЛОНАСС, а также систем ГЛОНАСС и GPS.

По результатам анализа контрольной информации, формируемой на борту КА, и проведенной оценки точностных характеристик ССН получены:

- погрешности определения системой координат и скорости центра масс КА;
- зависимости изменения геометрического фактора [8] при работе ССН по ГЛОНАСС, а также при совместном использовании ГЛОНАСС и GPS, характеризующие отношение погрешности определения положения (скорости) в БСКВУ к погрешности измерения псевдодалности.

Характер изменения пространственного геометрического фактора $\Gamma\Phi_{II}$ при использовании навигационного поля ГЛОНАСС и навигационного поля систем ГЛОНАСС и GPS приведен на рис. 7 и 8.

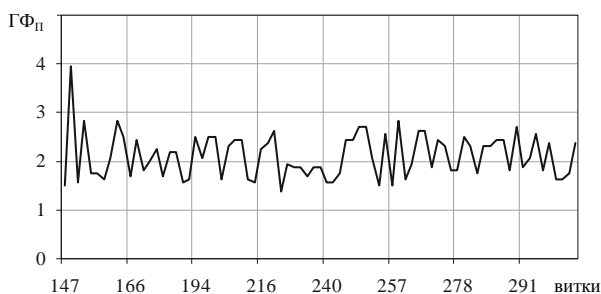


Рис. 7. Изменение пространственного геометрического фактора по виткам полета с использованием ГЛОНАСС (5.07.2013-15.07.2013)

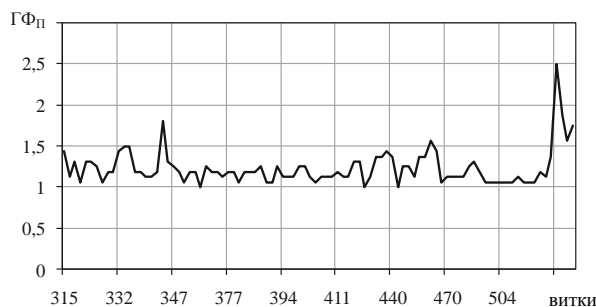


Рис. 8. Изменение пространственного геометрического фактора по виткам полета с использованием навигационного поля систем ГЛОНАСС и GPS (16.07.2013-30.07.2013)

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 7-8, показывает, что среднее значение пространственного геометрического фактора при использовании систем ГЛОНАСС и GPS на 40% меньше, чем при использовании только системы ГЛОНАСС.

Результаты оценки точностных характеристик ССН, полученные ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», приведены в таблице, в которой r , l , n , соответственно, обозначают радиальное направление, направление вдоль орбиты и бинормаль.

Результаты оценки точностных характеристик ССН

Навигационная система	Характеристика	Погрешности определения, м, см/с						Погрешности прогнозирования на 1 виток, м		
		Δr	Δl	Δn	ΔV_r	ΔV_l	ΔV_n	Δr	Δl	Δn
ГЛОНАСС	среднее	-2,4	-1,5	0,2	-0,3	0,1	-0,1	-9,4	49,8	0,9
	СКО	8,1	14,3	10,1	1,7	0,8	1,3	31,5	130,8	31,0
	max	25	48	38	5,7	3,1	4,0	-79,3	-362	80
ГЛОНАСС+GPS	среднее	-1,3	-0,8	1,4	-0,3	-0,1	0,1	-12,0	63,1	-1,0
	СКО	6,0	13,7	9,2	1,7	0,7	1,2	29,1	109,8	28,7
	среднее	22,0	50,1	47,2	6,2	2,1	4,8	-77,8	343	-76,9

Использование бортовой модели движения, учитывающей 16 гармоник ГПЗ, позволяет повысить точность прогнозирования параметров движения КА.

Точность навигации КА «Ресурс-П» обеспечивает координатную привязку по орбитальным данным на уровне, сопоставимом с зарубежными КА ДЗЗ Ikonos и Pleiades [13].

Выводы

Реализованная на КА «Ресурс-П» система спутниковой навигации в процессе своего функционирования обеспечивает точность определения параметров движения, необходимую для решения целевых задач и построения схем навигационного обеспечения процессов управления.

Результаты функционирования и оценки точностных характеристик ССН аппарата «Ресурс-П» с использованием навигационного поля системы ГЛОНАСС показали, что система навигации обеспечивает:

- погрешности определения положения центра масс КА (СКО) в радиальном направлении порядка 8 м, а по трансверсальной составляющей скорости порядка 0,8 см/с;
- погрешности прогнозирования положения центра масс в БКУ (СКО) на интервале одного витка полета КА в радиальном направлении и по бинормали порядка 32 м, вдоль орбиты порядка 131 м;
- погрешности ОНО пространственного положения центра масс КА (СКО) порядка 10 м, по скорости порядка 1,5 см/с.

При использовании совместного навигационного поля систем ГЛОНАСС и GPS погрешности прогнозирования определяемых ССН параметров движения центра масс КА в БКУ уменьшаются на 10-20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирилин, А.Н.** Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» / А.Н. Кирилин, Г.П. Аншаков, Р.Н. Ахметов, А.Д. Сторож – Самара: АГНИ, 2011. – 280 с.
2. **Ахметов, Р.Н.** Некоторые результаты анализа эксплуатации системы спутниковой навигации на КА «Ресурс-ДК» / Р.Н. Ахметов, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой, В.И. Рублев, Ю.М. Усталов, Р.А. Дзесов // XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2008 – С.318-323.
3. **Анфимов, Н.А.** ГЛОНАСС – основа средств координатно-временного и навигационного обеспечения Российской Федерации / Н.А. Анфимов, С.Г. Ревнивых // Полет. – 2007. – №8. – С.13-23.
4. **Ахметов, Р.Н.** Система спутниковой навигации КА «Ресурс-ДК1» / Р.Н. Ахметов, А.И. Мантуров, В.А. Мочалов, В.И. Рублев // Аэрокосмический курьер. – 2009. – №2. – С.42-43.
5. **Шебшаевич, Б.В.** Интегрированная навигационная аппаратура для низкоорбитальных космических аппаратов зондирования Земли / Б.В. Шебшаевич, А.Е. Тюляков, В.Е. Дружин В.Е., Д.Н. Федоров, А.В. Чухненко, Ю.Г. Антонов, А.И. Мантуров, В.И. Огарков // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2003. – С.69-76.
6. **Аншаков, Г.П.** Бортовое навигационное обеспечение космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Ресурс-ДК» / Г.П. Аншаков, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой, В.И. Рублев, Ю.М. Усталов // XIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2006. – С.187-194.
7. **Микрин, Е.А.** Результаты лётного эксперимента на МКС по исследованию влияния переотражений на решение задач навигации, ориентации и сближения по измерениям аппаратуры спутниковой навигации / Е.А. Микрин, М.В. Михайлов, С.Н. Рожков, А.С. Семёнов // XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2011 – С.303-313.
8. **Шебшаевич, Б.В.** Сетевые спутниковые навигационные системы / Б.В. Шебшаевич [и др.]. М.: Радио и связь, 1993. – 414 с.
9. **Рублев, В.И.** Методика апостериорной оценки точностных характеристик системы спутниковой навигации КА дистанционного зондирования Земли / В.И. Рублев, Ю.В. Ткаченко // XII Всероссийского научно-технический семинар по управлению движением и навигацией ЛА. – Самара: СГАУ, 2005. – С.114-117.
10. **Аншаков, Г.П.** Автономная навигация космических аппаратов / Г.П. Аншаков [и др.]. – Самара: ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 486 с.
11. **Анучин, О.Н.** Бортовые системы навигации и ориентации искусственных спутников Земли / О.Н. Анучин, И.Э. Комарова, Л.Ф. Порфирьев. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2004. – 326 с.
12. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.02). – М.: Военно-топографическое управление генерального штаба, 2006. – 30 с.
13. **Гомозов, О.А.** Роль и место в исследованиях по проблемным вопросам навигационно-геодезического обеспечения объектов ракетно-космической техники (РКТ) / О.А. Гомозов, И.П. Чугунов // Доклад на заседании секции №3 НТС ФГУП ЦНИИмаш. – М.: 2013. <http://glonass-ias.ru>

Abstract. The most important properties of the satellite navigation, including world-wide availability, low dependence on weather conditions, possibility to measure at any point on the globe and of the near-earth space, allow its successful use in control loop of observation satellites and provision of their autonomous operation. The article deals with problems of substantiating the configuration and composition of observation satellites' satellite navigation using radio navigation signals from global navigation satellite systems.

Key words: navigational support, onboard control system, satellite navigation system, navigational task solution