

Ахметов Р. Н., Аншаков Г. П., Мантуров А. И., Рублев В. И.

ОЧЕРЕДНОЙ ЭТАП СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Разработка и создание космических аппаратов (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]. 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 развёртывания глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) проводились проектные разработки по созданию систем спутниковой навигации. Система спутниковой навигации (ССН) бортового комплекса управления (БКУ) КА «Ресурс-ДК1», запущенного в 2006 году и успешно эксплуатируемого в настоящее время, позволяет обеспечивать автоматическое снабжение навигационной информацией процесса управления аппаратом [2].

30 сентября 2013 г. после завершения лётно-конструкторских испытаний введён 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. С целью уменьшения влияния перечисленных выше факторов снижения точности получения навигационной информации в ССН предусматривается статистическая обработка (фильтрация) результатов одномоментных навигационных определений (ОНО).

В качестве навигационной аппаратуры на КА типа «Ресурс» используется ряд модификаций бортового синхронизирующего координатно-временного устройства (БСКВУ), разработанного ОАО РИРВ по техническому заданию ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и решающего функциональные задачи по проведению измерений дальности и радиальной скорости до навигационных спутников (НС) с получением результатов одномоментных навигационных определений.

Программно-алгоритмическое обеспечение ССН реализует следующие функциональные задачи:

организация взаимодействия алгоритмов ССН по получению навигационной информации (периодическое включение программ ССН с целью выдачи параметров движения центра масс (ПДЦМ) КА в БКУ и формирования контрольной информации о работе ССН);

управление БСКВУ в предусмотренных режимах работы: съёма шкалы времени БСКВУ, съёма навигационной информации и контроля работоспособности БСКВУ;

определение ПДЦМ КА с использованием метода динамической фильтрации;

формирование массивов навигационной и контрольной информации, выдачи их в зоны информации оперативного контроля (ИОК) и программной телеметрической информации (ПрТМИ) для контроля функционирования ССН, оценки характеристик ССН и использования в наземном комплексе управления;

прогнозирование ПДЦМ КА на необходимый момент времени.

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

в качестве навигационной аппаратуры использовано одночастотное 16-ти 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. с периодичностью поступления первичной навигационной информации из БСКВУ 2 мин.;

периодичность обновления навигационной информации в БКУ – 20 мин.;

в системе используется модель движения центра масс КА, учитывающая четыре гармоники гравитационного потенциала Земли (ГПЗ).

С учётом повышенных требований, предъявляемых к КА «Ресурс-П» и его навига-

ционной системе, а также уровня развития спутниковых систем и навигационной аппаратуры, создана усовершенствованная система спутниковой навигации. На КА «Ресурс-П» в ССН были реализованы следующие технические решения и подходы:

навигационные алгоритмы ССН, реализованные с учётом 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-ти 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.

При обработке одномоментных навигационных определений для фильтрации случайных ошибок применяется метод динамической фильтрации с использованием фильтра Калмана, реализованного в ССН в скалярной форме. При этом хранение всей выборки информации не требуется, достаточно хранить информацию о состоянии системы (ковариационная матрица погрешностей измерений) и получать текущий вектор ПДЦМ.

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.

Зависимость погрешности определения положения центра масс КА «Ресурс-П» по радиусу на уровне среднеквадратичных отклонений (СКО) от интервала статистической обработки приведена на рис. 1.

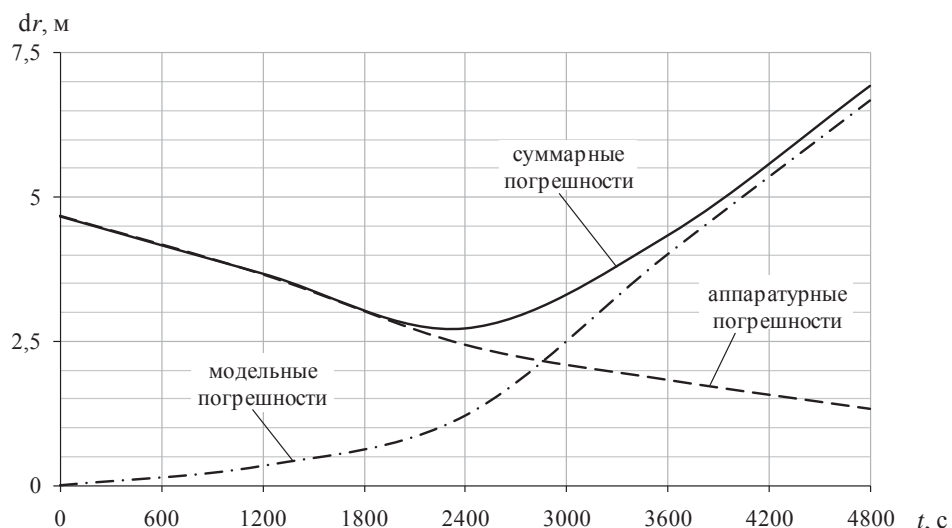


Рисунок 1 – Зависимость погрешности определения по радиусу от интервала обработки

На рис. 2 приведены зависимости погрешности прогнозирования по радиусу на уровне СКО на интервале 100 мин. для интервала обработки 40 мин. при использовании в ССН модели движения центра масс КА, учитывающей 4, 8, 16 гармоник ГПЗ.

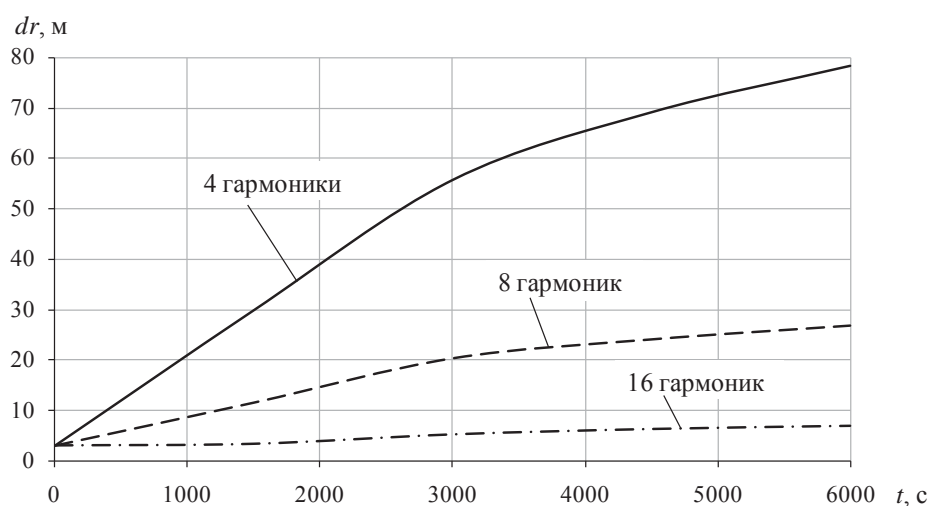


Рисунок 2 – Зависимость погрешностей прогнозирования по радиусу на интервале 100 мин.

Из анализа зависимостей, приведённых на рис. 1, 2, можно сделать следующие выводы:

погрешности определения положения центра масс КА минимальны при фильтрации результатов ОНО на интервале ~ 40 мин.;

дальнейшая перспектива повышения точностных характеристик ССН связана, в частности, с реализацией в БКУ модели движения центра масс аппарата, учитывающей большее количество гармоник ГПЗ.

С целью подтверждения выполнения требований к системе и проектных (априор-

ных) характеристик ССН на этапе лётных испытаний КА «Ресурс-П» проведена апостериорная 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 [3].

Эталонная орбита определялась по результатам обработки навигационной информации в составе ИОК и ПрТМИ на интервале нескольких витков полёта КА с периодичностью 0,5 витка. Определение параметров эталонной орбиты проводилось 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. Результаты оценки точностных характеристик ССН приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты оценки точностных характеристик ССН

Навигационная система	Показатель	Погрешности определения, м, см/с						Погрешности прогнозирования на 1 виток, м		
		Δr	Δl	Δn	ΔV_r	ΔV_l	ΔV_n	Δr	Δl	Δn
ГЛОНАСС	m	-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	m	-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
	max	22,0	50,1	47,2	6,2	2,1	4,8	-77,8	343	-76,9

Реализованная на КА «Ресурс-П» система спутниковой навигации в процессе своего функционирования обеспечивает точность определения параметров движения, необходимую для решения целевых задач аппарата и построения схем навигационного обеспечения процессов управления аппаратом, включая наземный комплекс 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) по радиусу 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 полёта КА по радиусу и 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.

Библиографический список

- 1 Кирилин, А.Н. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [Текст]/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» [Текст]/ 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 «Электроприбор», 2008 – С. 318-323.
- 3 Рублев, В.И. Методика апостериорной оценки точностных характеристик системы спутниковой навигации КА дистанционного зондирования Земли [Текст]/ В.И. Рублев, Ю.В. Ткаченко // XII Всероссийского научно-технический семинар по управлению движением и навигацией ЛА. – Самара: СГАУ, 2005. – С. 114-117.