

Вопросы управления движением и навигации летательных аппаратов, обработки и испытаний систем управления

УДК 629.78.05

Аншаков Г.П., Антонов Ю.Г., Мантуров А.И., Усталов Ю.М.

УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В последние годы отмечается повышение требований к пространственному разрешению, оперативности и производительности низкоорбитальных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) – их основным тактическим показателям. Это мотивируется возрастающими потребностями получения информации о локальных районах поверхности Земли с помощью КА, использующих аппаратуру наблюдения (АН), оптическая ось которой фиксирована относительно конструктивных осей аппарата. Практические задачи потребителей связываются с наблюдением маршрутов различной конфигурации, произвольно расположенных относительно трассы полета КА, а также с возможностью использования аппаратуры наблюдения с узкой полосой захвата – шириной от нескольких единиц до десятков километров. В качестве маршрутов наблюдения могут быть линейные маршруты, ширина которых соответствует ширине полосы захвата АН; криволинейные и другие, представляемые комбинацией первых. Длина маршрутов может быть как сравнимой с шириной полосы захвата АН, так и значительно превышать ее в зависимости от особенностей задач наблюдения [1].

Современные системы управления угловым движением, широко используемые на низкоорбитальных КА ДЗЗ, практически реализуют в подавляющем большинстве случаев программы управления угловым движением, отвечающие наблюдению маршрутов, эквидистантных трассе полета. Такие системы управления, как платформенного, так и бесплатформенного типа [2], используют в качестве осей ориентации вращающиеся оси – как правило, оси орбитальной системы координат (ОСК). Такие системы обеспечивают стабилизацию связанных осей КА в заданном относительно ОСК положении на протяжении каждого маршрута. При этом формирование программ углового движения аппарата осуществляется на Земле при планировании последовательности маршрутов съемки. Программа периодически передается

на борт КА для реализации и может, в зависимости от возможностей системы управления, корректироваться с учетом текущего состояния КА в полете. Это приводит к зависимости эффективности проведения съемки (по качеству, оперативности и производительности) от точности используемых на Земле навигационных параметров КА, необходимых для формирования программы управления.

Эффективное проведение процесса зондирования связывается как с повышенным точности и оперативности формирования программной траектории углового движения КА, так и с улучшением показателей систем управления, реализующих требуемые программные траектории в процессе полета. Характерной для осуществления процесса наблюдения становится тенденция формирования программной траектории непосредственно в бортовых системах управления. При наличии в составе КА системы навигации резко снижается отрицательное влияние «старения» навигационной информации на характеристики программной траектории, свойственного для процесса ее получения в наземных условиях. Появляется возможность формирования непрерывной программной траектории углового движения КА для сканирования маршрутов на планируемых интервалах съемки и углового движения на межмаршрутных интервалах времени, исходя из обеспечения наилучших показателей КА. Интеграция на борту КА в рамках процесса организации получения и обработки программ управления угловым движением функциональных возможностей системы навигации и ориентации с учетом текущего состояния других бортовых систем резко улучшает автономность КА и расширяет как условия оперативного формирования программ управления, так и условия их высокоточной реализации.

Пусть на некотором интервале времени полета КА (интервале наблюдения $[t_n^0, t_k^0] \in [t_0, t_k]$) задано некоторое упорядоченное по последовательности наблюдения множество маршрутов. Каждый маршрут задается совокупностью характеристик $\{\varphi^M, \lambda^M, A, \tau, \Delta H, (W/D)_{\text{зад}}^i\}$, где $i=1, 2, \dots$ - номер маршрута, φ^M, λ^M - координаты начала средней линии маршрута, A - азимут средней линии маршрута, τ - длительность сканирования маршрута, ΔH - превышение начала маршрута над общеземным эллипсоидом, $(W/D)_{\text{зад}}^i$ - параметр, определяющий значение скорости компенсации сдвига изображения

Для определения программы управления ориентацией КА в процессе наблюдения введем прямоугольную визирную систему координат (ВСК) (рис. 1). Центр ВСК совпадает с

центром масс КА; ось OY_B противоположна линии визирования, направленной из центра масс КА в наблюдаемую точку средней линии маршрута, т. е. противоположна вектору дальности \vec{D} от центра масс КА до наблюдаемой точки земной поверхности, определяющим программное положение оптической оси АН; ось OX_B совпадает с направлением вектора \vec{W} относительной скорости точки пересечения линии визирования и поверхности Земли на уровне средней линии маршрута в плоскости, перпендикулярной линии визирования, ось OZ_B дополняет систему до правой.

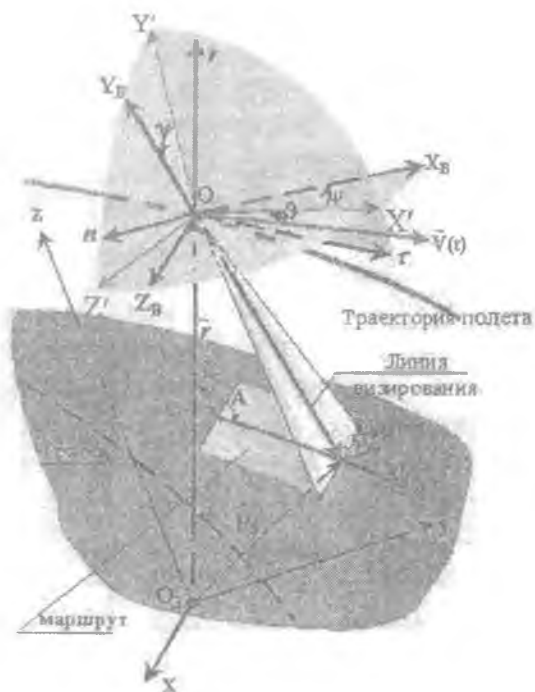


Рисунок 1 – Системы координат

Проекция вектора \vec{W} на оси OX_B и OZ_B обозначим соответственно W_{X_B} и W_{Z_B} . Будем полагать, что для каждого маршрута задается значение

$W_{X_B}/D = (W/D)^{\text{зад}}$, постоянное на

всем маршруте для его средней линии. На рисунке 1 - орбитальная система координат, направления осей которой приняты в соответствии с [3], α, γ, ψ - соответственно углы тангажа, крена, рыскания КА в ОСК; $\vec{V}(t)$ - скорость полета КА; $r(t)$ - радиус-вектор КА в инерциальной системе координат O_1XYZ ; \vec{p}_c - единичный вектор направления на север в точке начала маршрута; \vec{l}_m - единичный вектор направления средней линии маршрута.

Примем ВСК в качестве программной системы координат (ПСК), определяющей в каждый момент времени на маршрутах наблюдения и на межмаршрутных интервалах положение связанной системы координат КА. Полагаем при этом, что плоскость связанной системы координат, соответствующая плоскости $X_B OZ_B$, параллельна фокальной плоскости объектива АН, а ось связанной системы координат, соответствующая оси OX_B , конструктивно совпадает с направлением скорости компенсации сдвига изображения V_k , реализуемой в аппаратуре наблюдения и определяемой соотношением:

$$V_k = f \frac{W_{XB}}{D},$$

где f - фокусное расстояние объектива АН.

Тогда задание орт осей ВСК, ее угловых скоростей и ускорений относительно инерциальной системы координат эпохи t (ИСК) или относительно ОСК для каждого момента времени на указанных интервалах полностью определяет программу управления угловым движением КА или, иначе, программу управления ориентацией КА. Под программой управления ориентацией на интервале наблюдения понимаются матрица направляющих косинусов $Q(t)$; векторы угловой скорости $\vec{\omega}(t)$ и ускорения $\vec{\varepsilon}(t)$ осей ВСК, определяемые в ИСК или в ОСК в зависимости от того, относительно какой системы может ориентироваться КА.

Основные принципы формирования программы управления ориентацией, исходя из эффективного проведения процесса зондирования можно свести к следующим:

- использование для определения программы управления ориентацией параметров движения центра масс КА, определяемых системой навигации на момент времени, максимально приближенный к началу планируемого интервала проведения съемки маршрутов;
- автономное формирование программ углового движения КА (программного движения), исходя из обеспечения требований по точности определения скорости компенсации сдвига изображения на центральной линии маршрута в процессе съемки, а также по непре-

рывности (гладкости) параметров программы управления в процессе полета КА как на маршрутах, так и между маршрутами.

Характеристики непрерывной программы управления ориентацией, а именно, диапазоны изменения угловых скоростей и ускорений, вид функциональных зависимостей $Q(t)$, $\bar{\omega}(t)$, $\bar{\varepsilon}(t)$ играют важную роль при рассмотрении вопросов реализации программ системой управления КА. Характеристики программ определяются прежде всего расположением маршрутов наблюдения относительно трассы полета и условиями их сканирования. Поэтому определение характеристик программ управления ориентацией уже на стадии проектирования КА для возможного расположения маршрутов в полосе обзора служат основой для определения требований к бортовому комплексу управления (БКУ) КА по необходимым для реализации диапазонам углов ориентации, угловых скоростей и ускорений и другим характеристикам.

В соответствии с предложенной в [3] схемой определения программ углового движения КА ниже представлены иллюстрации характеристик программ ориентации, а именно, изменения модуля векторов абсолютной угловой скорости $|\bar{\omega}|$ и углового ускорения $|\bar{\varepsilon}|$ при сканировании различных маршрутов с высоты полета ~ 250 км. Расположение маршрутов относительно трассы полета представлено на рисунке 2, где φ, λ - географические широта и долгота, соответственно. На рисунках принято: Δ_A, Δ_w - отклонения A и $(w/D)_{зад}^{-1}$ от их соответствующих значений для маршрута эквидистантного трассе полета КА; $A = A_0 + \Delta_A$, $(w/D)_{зад}^{-1} = (w/D)_0^{-1} + \Delta_w$, азимут A_0 и параметр $(w/D)_0^{-1}$ определяют скорость бега изображения для соответствующего маршрута, эквидистантного трассе полета.

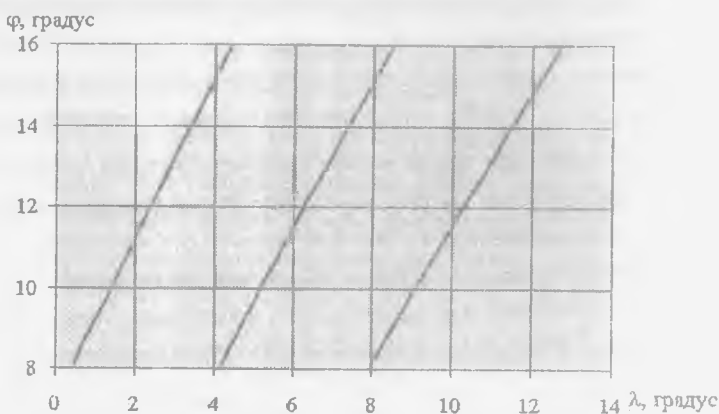


Рисунок 2 – Схема расположения маршрутов

Результаты оценки характеристик программы управления (рисунки 3а-3г, 4а-4г, 5а-5г соответственно для маршрутов, начинающихся в точках В, С, D, указанных на рисунке 2) показывают следующее.

Наблюдение маршрутов, не эквидистантных трассе полета, требует увеличения абсолютных угловых скоростей и ускорений КА. Например, для маршрута с азимутом A , отличающимся от азимута маршрута, эквидистантного трассе A_0 , на величину $\Delta A = \pm (5-10)$ градусов, в 3-5 раз. Наблюдение маршрутов при значениях параметра бега изображения, отличающихся от

$(\frac{w}{D})_0^{-1}$ на величину $\Delta w = \pm 5c$, требует увеличения абсолютных угловых скоростей и ускорений в 4-10 раз в зависимости от длительности маршрута, значения ΔA и расположения маршрута в полосе обзора.

Таким образом, наблюдение маршрутов, не эквидистантных трассе полета, с обеспечением заданной скорости бега изображения, диктует существенно более высокие требования к системе управления угловым движением, чем наблюдение маршрутов, эквидистантных трассе. Формирование в БКУ непрерывной программы управления ориентацией КА на интервалах наблюдения, обеспечивающей гладкость фазовой траектории по углам, по угловым скоростям и ускорениям, позволяет использовать ее в системе управления движением вокруг центра масс КА в режиме стабилизации, т.е. в режиме отслеживания заданной программы.

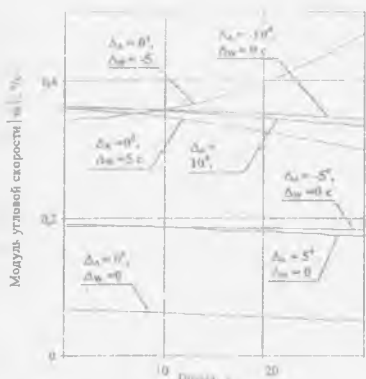


Рис. 3а

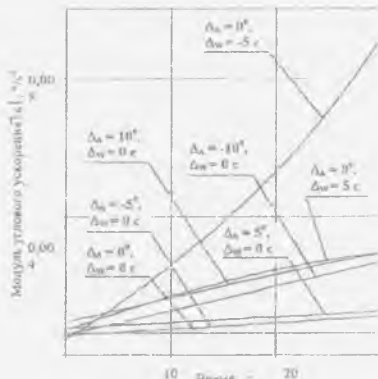


Рис. 3б

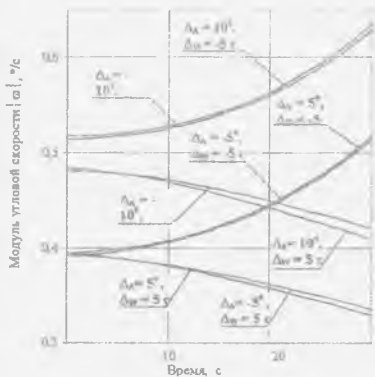


Рис. 3в

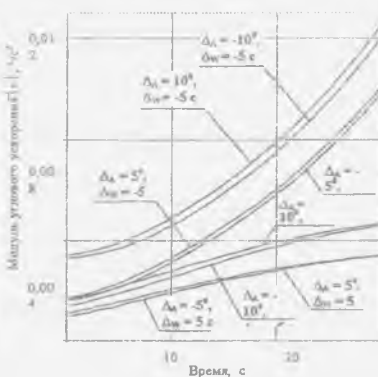


Рис. 3г

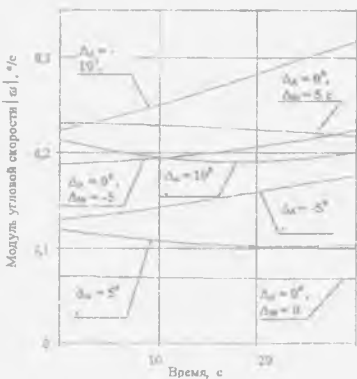


Рис. 4а

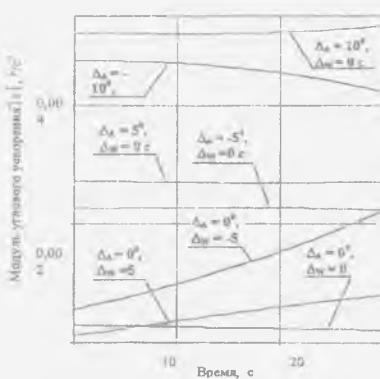


Рис. 4б

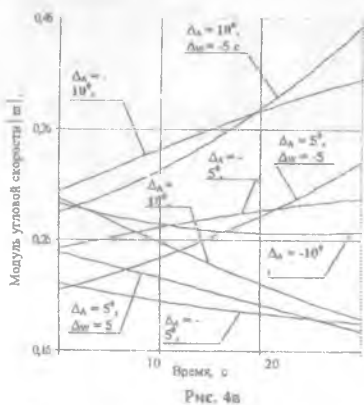


Рис. 4в

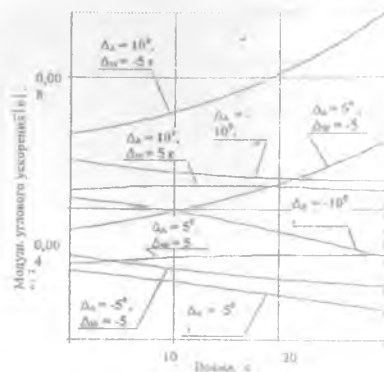


Рис. 4г

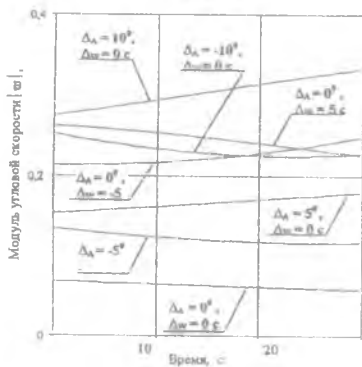


Рис. 5а

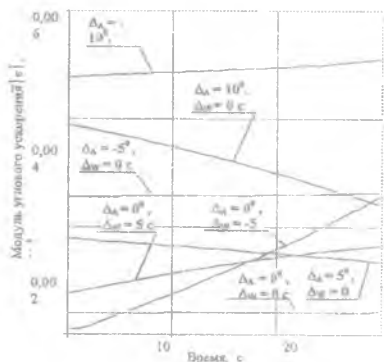


Рис. 5б

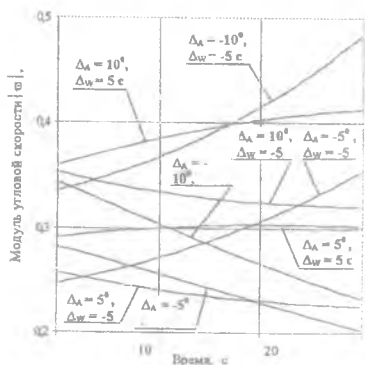


Рис. 5в

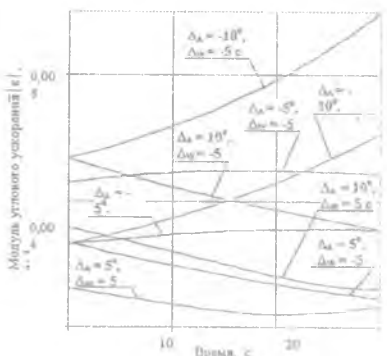


Рис. 5г

Процесс управления угловым движением КА можно представить состоящим из совокупности процессов, которые выполняются представленными на рисунке 6 системами бортового комплекса управления [4].

Процесс организации формирования программной траектории и организации взаимодействия бортовых систем для ее реализации складывается из ряда частных процессов, являющихся составной частью общего процесса организации работы КА, реализуемого в рамках программно-математического обеспечения организующей системы (ОС) БКУ.

В подсистеме координации управления и планирования работы КА с учетом информации о текущем состоянии КА определяется исходная информация для формирования программ углового движения КА и порядок взаимодействия подсистем для их реализации.

Подсистемой баллистико-навигационного обеспечения (БНО) формируются программы управления для вариантов проведения съемки, задаваемых подсистемой координации управления и планирования.

Подсистема исполнения программ и команд управления обеспечивает управление системами навигации и ориентации и другими управляемыми системами.

Основополагающим фактором, определяющим точность программ управления, является точность используемой навигационной информации. В связи с этим интервал времени, для которого может быть сформирована программная траектория полностью зависит от интервала прогнозирования параметров движения с допустимой точностью. Для выполнения требований по точности прогноза необходимо периодическое уточнение (обновление) параметров движения центра масс КА. Этот процесс с точки зрения получения высокой точности параметров движения целесообразно реализовать в рамках системы навигации, использующей в качестве первичной навигационной информации параметры движения центра масс КА, получаемые с помощью навигационной аппаратуры потребителей (НАП), работающей по радионавигационному полю системы «Глонасс» [5]. После периодической обработки по методу динамической фильтрации поступающей из НАП информации, получаемые системой навигации параметры движения центра масс используются подсистемой БНО для определения программ углового движения КА на планируемых интервалах съемки.



Рисунок 6 – Функциональная схема системы управления угловым движением

- 1 – план задач ориентации КА,
- 2 – контрольная информация,
- 3 – навигационная информация,
- 4 – программа управления ориентацией,
- 5 – управляющие связи.

Отслеживание программной траектории углового движения, формируемой организующей системой, осуществляется системой ориентации. Для обеспечения высокоточного отслеживания программной траектории углового движения КА в системе ориентации в качестве датчика измерительной информации об угловом положении связанного с КА триэдра осей относительно некоторого запоминаемого базового инерциального триэдра осей целесо-

образно использование бесплатформенной инерциальной системы на основе электростатического гироскопа [6]. Для привязки базового инерциального триэдра осей к инерциальной системе координат эпохи t , в которой определяется и задается программа углового движения КА, в системе ориентации целесообразно использовать автоматические датчики определения координат звезд [7]. Они позволяют алгоритмически определять как начальную выставку базового инерциального триэдра осей относительно ИСК эпохи t , так и информацию для коррекции этого инерциального триэдра при его уходе от начального положения (дрейфе триэдра).

Совмещение в процессе полета КА осей связанной системы координат с ее программным положением, т.е. с осями ВСК, может обеспечиваться в системе ориентации, например, на основе использования силовых гироскопических комплексов [2].

Для обеспечения надежности получения измерительной информации в системе могут использоваться и другие измерители, например, измерители угловой скорости на основе волоконно-оптического гироскопа.

Подсистема координации управления и планирования работы КА обеспечивает с помощью системы навигации, подсистем БНО и контроля состояния КА координацию получения программ управления и их реализацию системой ориентации на интервалах времени, отвечающих требованиям по точности управления.

Таким образом, представлено решение основных задач эффективного управления угловым движением КА ДЗЗ на основе автономного формирования программы ориентации на борту и использования в бортовом комплексе управления бесплатформенной инерциальной системы ориентации и спутниковой системы навигации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. Агалов. Первый снимок метрового разрешения с КА Ikonos. Новости космонавтики №12, 1999 г, стр.37.
2. Г.П.Аншаков, Ю.Г.Антонов, В.П.Макаров и др. Этапы и результаты создания систем управления движением космических аппаратов наблюдения. Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике. г.Самара, 1999 г, стр.88-98.
3. Г.П.Аншаков, Ю.Г.Антонов, А.И.Мантуров, Ю.М.Усталов. Формирование программ управления ориентацией космических аппаратов наблюдения. Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике. г.Самара, 2001 г,стр.16-25.

- 4 Г.П. Аншаков, Ю.Г. Антонов, А.И. Мантуров, Ю.М. Усталов. Синтез организующей системы бортового комплекса управления перспективных КА наблюдения. Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике. г. Самара, 2001 г., стр. 45-51.
5. В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М. Радио и связь. 1993 г., 272 с.
6. Б.Е. Ландау, В.Д. Аксененко и др. Электростатический гироскоп со сплошным ротором и бескарданная система ориентации космического аппарата на его основе. Гироскопия и навигация №1, 2001 г., стр. 3-14
- 7 В.Н. Бранец, Н.Н. Севастьянов. Система управления спутника связи «Ямал-100». VII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2000 г., стр. 7-13.

УДК 629.78.015

Асланов В.С., Дорошин А.В.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА С ЧАСТИЧНОЙ ЗАКРУТКОЙ КАК СИСТЕМЫ СООСНЫХ ТЕЛ С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ

При осуществлении неуправляемого спуска малого спускаемого аппарата (СА) необходимо выдавать направленный тормозной импульс, обеспечивающий сход с орбиты. Для стабилизации направления выдачи тормозного импульса может использоваться частичная закрутка СА, когда во вращение приводится только часть аппарата. В работе [1] рассмотрено движение СА с постоянной массой и малой динамической асимметрией в случае частичной закрутки. Вследствие выгорания топлива в тормозной двигательной установке на активном участке траектории спуска система характеризуется переменностью массы. Поставим задачу исследования движения механической системы соосных тел с переменной массой, центр масс которой движется в инерциальном пространстве.