

А. С. ГАЛКИНА, А. И. МАНТУРОВ, В. И. РУБЛЕВ, В. Е. ЮРИН

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Рассматриваются вопросы оценки точности формирования и контроля отработки программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли при использовании системы спутниковой навигации.

Введение

Получаемая с помощью космического аппарата (КА) зондирования Земли информация находит все большее применение в широком спектре решаемых прикладных задач. Со стороны потребителей такой информации предъявляются различные требования к ее качеству. Требования определяют прежде всего экономическую эффективность использования информации, получение информации в различных диапазонах электромагнитного спектра с необходимым пространственным и радиометрическим разрешением в полосе захвата используемой аппаратуры зондирования и в необходимой полосе обзора, оперативность получения потребителями информации необходимого объема [1, 2].

Важнейший вклад в выполнение этих требований вносят характеристики систем управления КА, от которых существенным образом зависит эффективность их эксплуатации. Исходя из обеспечения выполнения вышеуказанных требований и условий зондирования маршрутов основные принципы и методические основы разработки систем управления движением КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) рассмотрены в [3, 4]. Они предполагают автономное формирование программ управления и базируются на применении навигационной информации от бортовых источников, систем ориентации и стабилизации, использующих инерциальные датчики. При этом стабилизация КА на программных траекториях углового движения, формируемых в виде гладких непрерывных функций, осуществляется с помощью силовых гироскопических комплексов. Для построения программных траекторий углового движения как на маршрутах, так и на межмаршрутных интервалах необходимо построить упорядоченную по времени последовательность маршрутов зондирования. В обеспечение автономного решения задач планирования работы КА ДЗЗ, по задаваемой на борт совокупности маршрутов, в составе бортовых комплексов

Галкина Анастасия Сергеевна. Инженер-конструктор 1 категории ФГУП Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара).

Мантуров Александр Иванович доктор технических наук, профессор, начальник отдела ФГУП Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс».

Рублев Валерий Иванович. Заместитель начальника отдела ФГУП Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс».

Юрин Виталий Евгеньевич. Начальник группы ФГУП Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс».

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

управления (БКУ) появилась необходимость выделить так называемую организующую систему [3]. Эта система предназначена для выполнения функций высокого уровня управления – баллистико-навигационного обеспечения (БНО), планирования работы и координации управления аппаратами с учетом текущего состояния бортовых систем и других функций. Важной задачей этой системы является задача формирования программ управления угловым движением аппарата на некоторый планируемый интервал проведения наблюдений. При этом характеристики программ управления аппаратом, позволяющие отслеживать центральную линию маршрутов с необходимой точностью, должны обеспечивать выполнение условий зондирования по допустимой степени сдвига изображения в полосе захвата аппаратуры зондирования. Точность наведения аппаратуры зондирования на заданные маршруты приобретает все большее значение как одна из важнейших задач, решаемых при управлении современных КА ДЗЗ.

В БКУ КА «Ресурс-ДК1», в обеспечение выполнения вышеуказанных задач, функционируют система спутниковой навигации и программное обеспечение, выполняющее задачи баллистико-навигационного обеспечения аппарата с формированием программ управления угловым движением, а также системы, реализующие эти программы. Ниже представлен анализ функционирования системы спутниковой навигации и точности наведения аппаратуры зондирования на маршруты.

1. Анализ функционирования системы спутниковой навигации

С середины 2006 г. на изготовленном ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» и функционирующем по настоящее время КА ДЗЗ «Ресурс-ДК1» штатно эксплуатируется система спутниковой навигации с использованием как радионавигационного поля системы ГЛОНАСС, так и с совместным использованием радионавигационных полей систем ГЛОНАСС и GPS. Система проводит статистическую обработку одномоментных навигационных определений (ОНО), получаемых из навигационной аппаратуры. В качестве навигационной аппаратуры используется бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство (БСКВУ) [5].

Система спутниковой навигации (ССН) позволяет решать следующие функциональные задачи:

- проводить одномоментные измерения параметров движения аппарата;
- определять параметры движения центра масс аппарата по результатам статистической обработки одномоментных измерений;
- периодически обновлять параметры движения центра масс аппарата для автоматического использования в бортовом комплексе управления;
- формировать и накапливать навигационную и контрольную информацию для передачи в наземный комплекс управления.

Программное обеспечение системы навигации, реализованное в вычислительной системе БКУ КА, осуществляет управление и контроль функционирования БСКВУ и управление процессом периодического решения навигационной задачи.

Для статистической обработки одномоментных навигационных определений, получаемых из БСКВУ, служит программа определения параметров движения центра масс аппарата. В программе применен метод динамической фильтрации с использованием фильтра Калмана. При этом в программном обеспечении бортового комплекса управления реализована модель движения

центра масс аппарата, учитывающая четыре полные гармоники разложения гравитационного поля Земли и статическую модель плотности атмосферы. Статистическая обработка позволяет проводить определение параметров движения центра масс КА по поступающим из БСКВУ одномоментным навигационным определениям с периодичностью 2 мин. При этом длительность интервалов статистической обработки для периодического решения навигационной задачи может составлять от 20 до 100 мин в зависимости от возможности осуществления одномоментных измерений с помощью БСКВУ.

За время полета КА получен большой объем навигационной информации о результатах определения положения и скорости центра масс КА. Эта информация использовалась для апостериорной оценки точности параметров движения аппарата, определяемых системой (точностных характеристик ССН). Оценка точностных характеристик системы навигации проводилась в соответствии с разработанной для этапа летных испытаний методикой. В качестве эталонных параметров движения аппарата использовались параметры движения, соответствующие эталонной орбите. Такая орбита строилась по результатам статистической обработки значений параметров движения, получаемых системой с периодичностью 50-100 мин на интервалах времени длительностью до одних суток полета аппарата. Обработка проводилась на наземных вычислительных средствах с использованием метода наименьших квадратов и высокоточной модели движения центра масс КА, учитывающей 36 гармоник разложения гравитационного поля Земли.

По результатам оценки точностных характеристик среднеквадратические погрешности прогнозирования параметров движения центра масс, получаемых системой спутниковой навигации на различных интервалах полета аппарата, в прогнозе на один виток полета составляют: 50-70 м по радиусу и бинормали, 300-400 м по направлению вдоль орбиты.

Иллюстрации изменения погрешностей прогноза параметров движения аппарата по радиусу и вдоль орбиты на некоторых витках полета приведены на рис. 1, 2. Отметим, что в случае использования в БКУ модели движения центра масс с учетом восьми гармоник разложения гравитационного поля земли (ГПЗ), погрешности прогноза параметров движения могут быть существенно уменьшены.

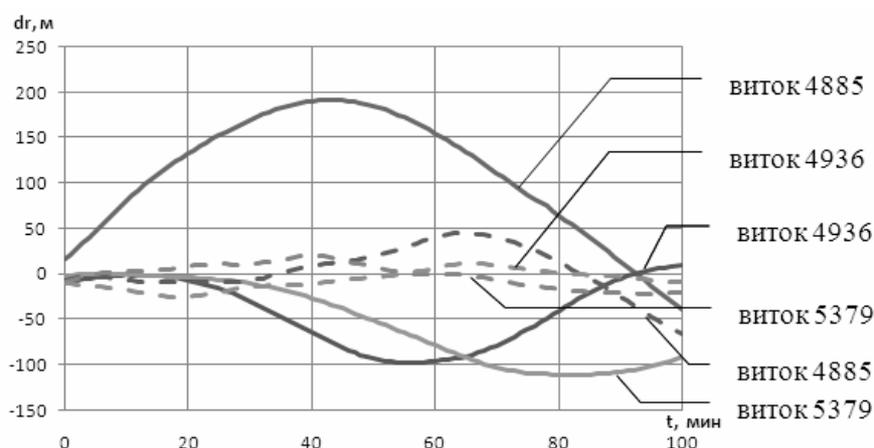


Рис. 1. Изменение погрешностей прогноза по радиусу на интервале 100 мин при использовании в БКУ моделей движения, учитывающих 4 гармоники ГПЗ (сплошные линии) и 8 гармоник (пунктирные линии)

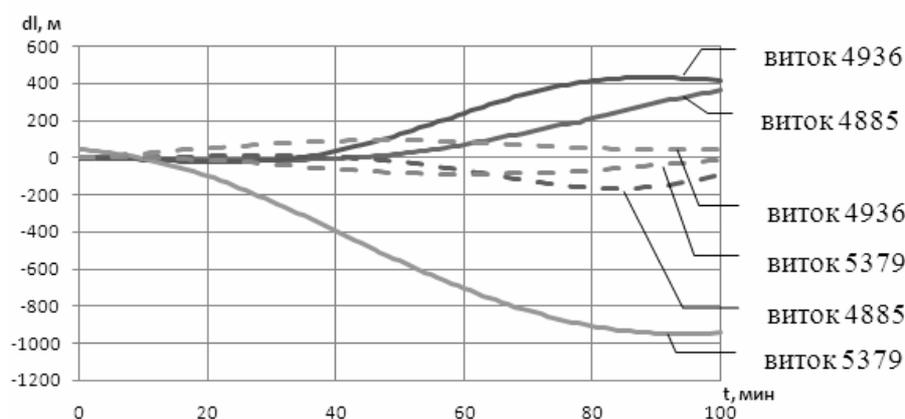


Рис. 2. Изменение погрешностей прогноза вдоль орбиты на интервале 100 мин при использовании в БКУ модели движения, учитывающей 4 гармоники ГПЗ (сплошные линии) и 8 гармоник (пунктирные линии)

2. Анализ точности формирования программ управления угловым движением

Периодическая оценка точностных характеристик в прогнозе на один виток полета показала, что точность прогноза параметров движения аппарата по результатам работы ССН в процессе штатной эксплуатации практически не меняется. Одновременно проводившаяся оценка погрешности одномоментных навигационных определений координат и составляющих вектора скорости аппарата, получаемых БСКВУ, показала, что их среднеквадратические погрешности не превышают по координатам 6 м и по составляющим вектора скорости 1 см/с. В течение полета отмечались случаи формирования в БСКВУ сбойных массивов навигационных определений, которые автоматически были отбракованы средствами контроля функционирования системы.

Система навигации позволила осуществить в БКУ КА «Ресурс-ДК1» организацию автоматического снабжения навигационной информацией всех бортовых потребителей, прежде всего программ бортового баллистического обеспечения.

Кроме того, возможность передачи бортовым комплексом управления параметров движения в наземный комплекс управления позволила снабжать навигационной информацией наземную инфраструктуру, предназначенную для планирования целевого применения и управления КА с минимальным привлечением наземных измерительных средств. Это, в свою очередь, позволило существенно облегчить эксплуатацию КА и повысить автономность его функционирования.

В основу управления КА «Ресурс-ДК1» положен программно-координатный метод с использованием передаваемых в БКУ исходных данных по районам зондирования. Реализация программно-координатного метода управления аппаратом предполагает автономное решение задач его баллистико-навигационного обеспечения (БНО). В первую очередь, в БКУ решаются задачи высокоточного определения параметров движения центра масс (ПДЦМ) аппарата с использованием ССН, оперативного прогнозирования параметров движения центра масс КА на заданные моменты времени на интервале планирования, формирования программ управления угловым движением КА на интервалах решения целевых, функциональных задач и ряда других задач.

Управление угловым движением КА «Ресурс-ДК1» осуществляется в соответствии с программой управления, формируемой в рамках БНО БКУ. Программа определяет положение осей программной системы координат (ПСК) в инерциальной системе координат (ИСК) текущей эпохи на планируемом интервале работы аппаратуры зондирования. Программная система координат в каждый момент времени определяет требуемое (расчетное) угловое положение связанной системы координат (ССК) КА в ИСК [4].

Расчет параметров углового движения программных осей изделия в ИСК осуществляется в виде матрицы направляющих косинусов положения ПСК относительно ИСК (M), проекций векторов абсолютной угловой скорости ($\bar{\omega}$) и абсолютного углового ускорения ($\bar{\epsilon}$) на оси ПСК на заданное время. Программа управления угловым движением аппарата на участке работы целевой аппаратуры (ЦА) планируется, исходя из обеспечения реализации требуемых видов съемки. Интервал оперативного планирования по времени составляет около одного периода орбиты и включает в себя интервал времени полета КА над освещенной территорией. Для КА «Ресурс-ДК1» заявленные виды съемки – объектовая, маршрутная, стереосъемка – представляются как набор отдельных маршрутов. Маршрут – непрерывно наблюдаемый участок земной поверхности, определяемый составом характеристик:

$$\{\varphi, \lambda, A, \Delta H, \vartheta_y, (W_{ХП/D})_{Зад}, \tau_M, \alpha_{СПА}\}, \quad (1)$$

где φ, λ – геоцентрическая широта и долгота начальной точки маршрута; A – азимут центральной линии маршрута в начальной точке; $(W_{ХП/D})_{Зад}$ – параметр, определяющий требуемую скорость бега изображения для центральной линии визирования; ΔH – среднее на маршруте превышение над общеземным эллипсоидом; ϑ_y – заданный угол упреждения на начало наблюдения маршрута; τ_M – длительность интервала наблюдения маршрута; $\alpha_{СПА}$ – признак условий зондирования маршрута.

Под центральной линией маршрута понимается линия, соединяющая начальную и конечную точки зондируемого маршрута на земной поверхности. При задании упорядоченного массива характеристик маршрутов на интервал автономного полета КА, например на одни сутки, оперативное планирование и формирование программы управления угловым движением аппарата осуществляется периодически – при необходимости на каждом витке полета.

Алгоритмы синтеза программного углового движения КА базируются на использовании следующих принципов:

- автономное определение программ углового движения КА исходя из обеспечения требуемых условий сканирования маршрутов и условий непрерывности изменения параметров программ управления в процессе полета КА;
- использование для определения программ управления угловым движением параметров движения центра масс КА, получаемых системой навигации на моменты времени, максимально приближенные к началу планируемых интервалов зондирования маршрутов;
- определение параметров программы в рамках ограничений по возможности реализации системой ориентации и стабилизации необходимых угловых скоростей и ускорений КА.

Определение программы управления угловым движением КА проводится до начала съемки первого маршрута сразу для всех маршрутов, которые принад-

лежат планируемому интервалу зондирования, на так называемом подготовительном участке режима работы целевой аппаратуры (рис. 3). При этом используются параметры движения центра масс КА, полученные ССН на время начала подготовительного участка режима работы целевой аппаратуры. При этом максимальная длительность интервала прогнозирования параметров движения КА при расчете программы управления КА на интервале оперативного планирования по времени не превышает 60 мин.

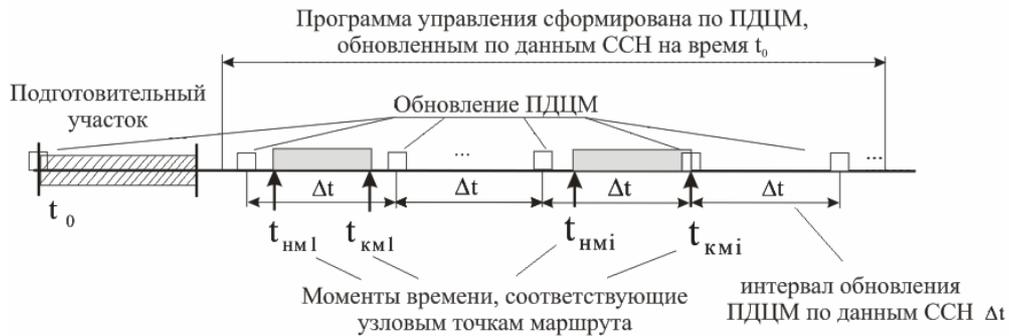


Рис. 3. Обновление навигационной информации при формировании и обработке программы управления

Точность отработки космическим аппаратом программы управления, т.е. точность наведения бортовым комплексом управления центральной линией визирования (ЦЛВ) – оси OY программной системы координат – в начальную точку центральной линии маршрута с характеристиками (1) и ее отслеживания обусловлена в наибольшей степени следующими факторами:

- ошибками прогнозирования ПДЦМ КА при расчете ПУУД КА на подготовительном участке режима работы ЦА.
- ошибками ориентации КА, которые включают в себя допустимые ошибки отработки программы управления.

Например, в соответствии с проектными характеристиками КА «Ресурс-ДК1», максимальное отклонение возможного положения ЦЛВ от расчетного в проекции на земную поверхность, обусловленное только ошибками прогноза на интервале 60 мин, составляет около 780 м. Примем, что максимальные погрешности ориентации аппарата по всем угловым каналам составляют не более 7 мин. В этом случае, применительно к КА «Ресурс-ДК1», функционирующего на эллиптической орбите, максимальное отклонение ЦЛВ от расчетного, обусловленное только ошибками ориентации, может достигать: при прохождении аппаратом положения апогея орбиты – не более 3100 м, при прохождении положения перигея – не более 1800 м.

При проведении некоторых видов съемки могут быть наложены ограничения на общую длительность участка зондирования, что уменьшает максимальный интервал прогноза и снижает влияние ошибок прогноза на точность формирования программ управления. Так, например, для зондирования маршрута при его стереосъемке, интервал прогноза не превосходит 22 мин. По априорным оценкам, максимальное отклонение положения точки пересечения ЦЛВ с поверхностью общеземного эллипсоида от номинального расчетного положения, обусловленное только ошибками прогноза на интервале до 22 мин, составит около 220 м.

3. Постановка задачи и предлагаемое решение

В целях уменьшения ошибок знания фактических точек пересечения ЦЛВ с поверхностью эллипсоида представляется возможным проводить расчет координат точек центральных линий маршрутов зондирования на некоторые узловые моменты времени (например, начальные и/или конечные точки маршрутов) в БКУ непосредственно на участках работы ЦА. При этом, после отработки системой управления движением программ управления угловым движением аппарата, для расчета фактических координат точки пересечения ЦЛВ с земной поверхностью используются параметры движения КА, обновляемые ССН с минимальной периодичностью (см. рис. 3), а также данные об измеренном угловом положении КА.

Для решения поставленной задачи бортовым комплексом управления на фоне отработки программ управления КА рассмотрен алгоритм оперативного расчета координат точки пересечения ЦЛВ с общеземным эллипсоидом, блок-схема которого представлена на рис. 4.

Система спутниковой навигации обновляет параметры движения КА с заданной периодичностью Δt от времени начала подготовительного участка t_0 (см. рис. 3), на котором формируется программа управления угловым движением для съёмки маршрутов. Алгоритм расчета координат точек центральной линии маршрутов зондирования использует параметры движения КА, спрогнозированные на моменты времени, соответствующие назначаемым узловым точкам маршрута t_{HM_i} и t_{KM_i} , от момента последнего обновления навигационной информации, и измеренные кватернионы ориентации ПСК в ИСК на эти же моменты времени.

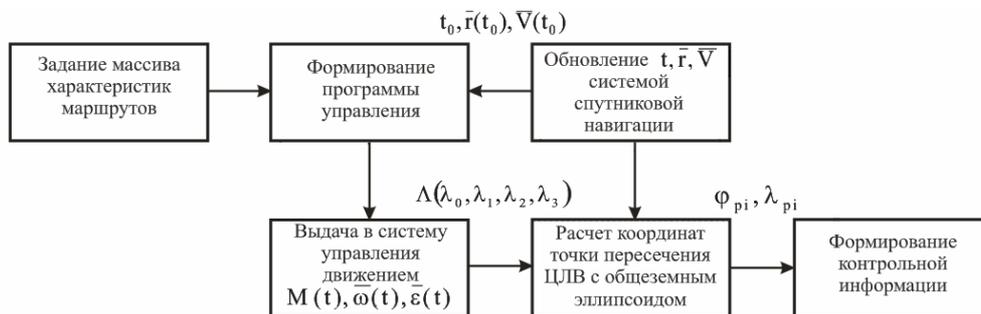


Рис. 4. Обобщенная схема алгоритма решения задачи

Алгоритм реализует вычисление геоцентрической широты φ и долготы λ для узловой точки (на время t_λ), которая определяется радиусом-вектором R_3 :

$$\varphi = \arcsin \frac{R_{3Z}}{R_3}, \quad (2)$$

$$\lambda = \arcsin \frac{R_{3Y}}{R_3 \cdot \cos \varphi}, \quad \text{sign}(\cos \lambda) = \text{sign}(R_{3X}). \quad (3)$$

Вычисление $\bar{R}_3 = \{R_{3X}, R_{3Y}, R_{3Z}\}$ – радиуса-вектора точки, которая является пересечением ЦЛВ и поверхности общеземного эллипсоида, проводится

по формуле

$$\bar{R}_3 = \bar{r} + \bar{D}. \quad (4)$$

Вычисление вектора дальности \bar{D} по направлению вектора $\bar{l} = \bar{l}_D$ проводится по формуле

$$\bar{D} = \bar{l} \cdot D, \quad (5)$$

где D – модуль вектора \bar{D} или расстояние от центра масс КА до точки пересечения ЦЛВ с поверхностью общеземного эллипсоида (с учетом превышения на маршруте), который рассчитывается следующим образом:

$$D = -\frac{r_{\text{пн}} + \sqrt{r_{\text{пн}}^2 + l_{\text{п}}^2 \cdot ((R_3 + \Delta H)^2 - r_{\text{п}}^2)}}{l_{\text{п}}}. \quad (6)$$

где: $r_{\text{п}}$ – модуль приведенного радиуса-вектора $\bar{r}_{\text{п}} = \{X, Y, Z/k_{\alpha}\}$; $l_{\text{п}}$ – модуль приведенного вектора $\bar{l}_{\text{п}} = \{l_X, l_Y, l_Z/k_{\alpha}\}$; $r_{\text{пн}} = (\bar{r}_{\text{п}} \cdot \bar{l}_{\text{п}})$ – приведенная проекция вектора $\bar{r}_{\text{п}}$ на вектор $\bar{l}_{\text{п}}$.

Направляющий вектор дальности \bar{l}_D рассчитывается по формуле:

$$\bar{l}_D = [M_{\text{иг}}] \cdot \bar{l}_{D\text{и}}, \quad (7)$$

где $[M_{\text{иг}}]$ – матрица перехода от ИСК к ГСК, которая формируется следующим образом:

$$[M_{\text{иг}}] = \begin{bmatrix} \cos S & \sin S & 0 \\ -\sin S & \cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где S – звездное время.

$\bar{l}_{D\text{и}}$ – единичный вектор дальности от центра масс КА до точки на земной поверхности. Компоненты этого вектора рассчитываются в ИСК по известным элементам измеренного кватерниона Λ ориентации ССК в ИСК по формулам:

$$l_{D\text{Xi}} = 2 \cdot (\lambda_0 \cdot \lambda_3 - \lambda_1 \cdot \lambda_2), \quad (9)$$

$$l_{D\text{Yи}} = -\lambda_0 \cdot \lambda_0 + \lambda_1 \cdot \lambda_1 - \lambda_2 \cdot \lambda_2 + \lambda_3 \cdot \lambda_3, \quad (10)$$

$$l_{D\text{Zи}} = -2 \cdot (\lambda_0 \cdot \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \lambda_3). \quad (11)$$

Результаты расчета – координаты λ , φ узловых точек центральной линии маршрута (1) и отклонений их от расчетных номинальных значений определяются в этом случае ошибками обработки программ управления системой ориентации и ошибками прогнозирования параметров движения КА на коротком интервале времени не превышающем Δt после обновления навигационной информации. Максимальное отклонение возможного положения ЦЛВ от расчетного в проекции на земную поверхность, которое обусловлено только ошибками прогноза составит на интервале до $\Delta t = 2$ мин – около 25 м, на интервале до $\Delta t = 4$ мин – около 30 м.

Ниже представлены некоторые результаты моделирования программы управления угловым движением КА «Ресурс-ДК1». В соответствии с предложенным алгоритмом моделируется оперативный расчет и формируется контрольная информация по точности обработки программы управления.

На рис. 5 представлено расположение маршрутов на земной поверхности внутри полосы обзора КА, ограниченной углом крена 45° , при этом общая длительность участка работы ЦА составляет 40 мин.

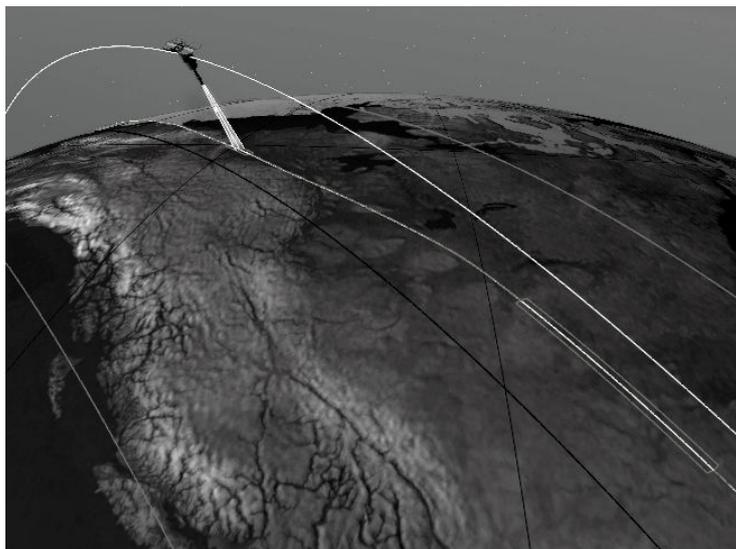


Рис. 5. Расположение маршрутов съемки на земной поверхности

На рис. 6 и 7 представлены параметры программы управления угловым движением КА для съемки маршрутов, изображенных на рис. 5. Интервалы временных, соответствующие работе ЦА, выделены.

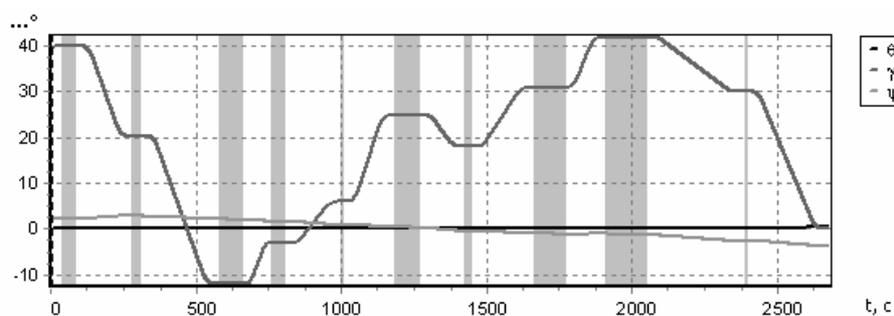


Рис. 6. Изменение углового положения ПСК в ОСК

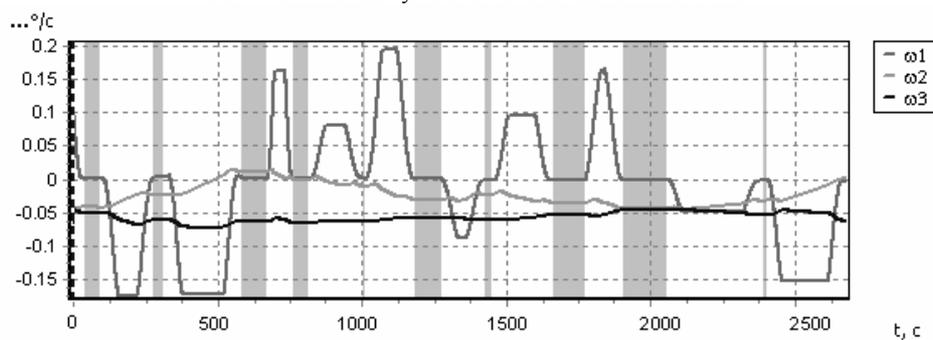


Рис. 7. Изменение угловой скорости ПСК в ИСК в проекциях на оси ИСК

На рис. 8 представлена зависимость от длительности интервала работы ЦА максимального отклонения возможного положения ЦЛВ от расчетного в проекции на земную поверхность, обусловленное только ошибками прогноза при формировании программы управления КА. Предлагаемый алгоритм уточнения координат λ , φ узловых точек ЦЛМ при этом не использовался.

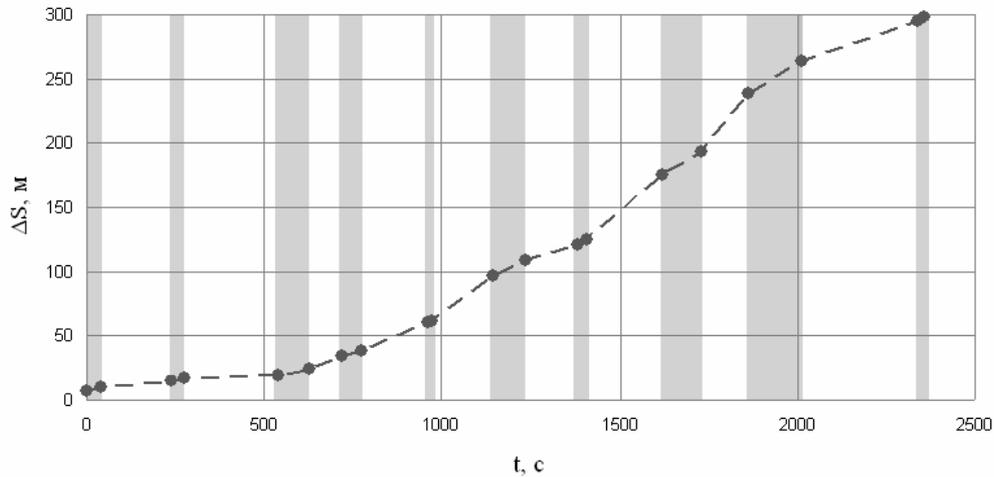


Рис. 8. Отклонение возможного положения ЦЛВ от расчетного в проекции на земную поверхность, обусловленное только ошибками прогноза по результатам формирования программы управления

На рис. 9 представлена зависимость от длительности интервала работы ЦА отклонения возможного положения ЦЛВ от рассчитанного в соответствии с предлагаемым алгоритмом. Интервал обновления навигационной информации Δt взят равным 2 мин.

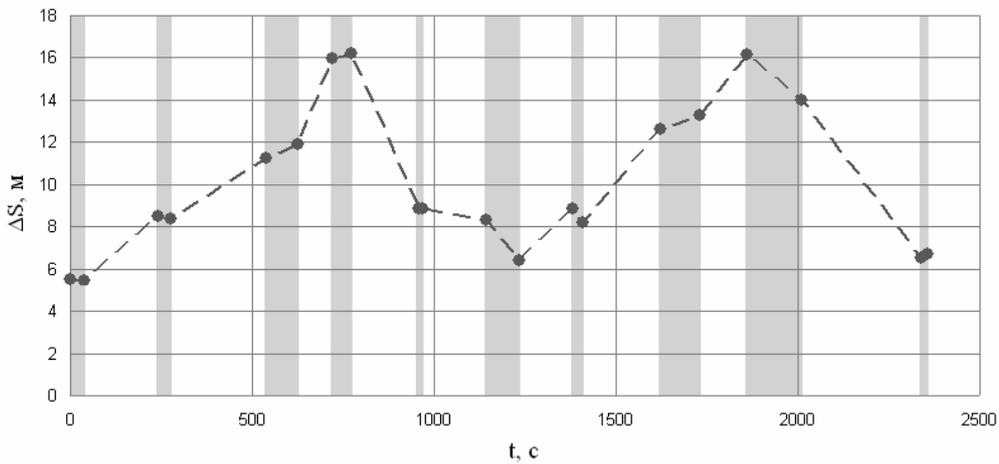


Рис. 9. Отклонение возможного положения ЦЛВ от расчетного в соответствии с предлагаемым алгоритмом, обусловленное только ошибками прогноза

В приведенном примере программы управления угловым движением КА для съемки 10 маршрутов максимальное отклонение возможного положения ЦЛВ от расчетного ΔS не превышает предельного значения ($\Delta S < 780$ м) для интервала прогнозирования ПДЦМ КА до 60 мин. Использование предлагаемого алгоритма уточнения координат λ , φ узловых точек ЦЛМ приводит к значительному улучшению точности наведения ЦЛВ на зондируемые участки земной поверхности: максимальное отклонение возможного положения ЦЛВ от расчетного ΔS может составлять около 25-30 м.

Выводы

Рассмотрены аспекты решения одной из важных задач, решаемых при управлении современных КА ДЗЗ – задачи формирования программ управления угловым движением аппарата на некоторый планируемый интервал проведения наблюдений. Проанализированы факторы, влияющие на точность отслеживания центральной линии маршрутов.

Предложен алгоритм уточнения координат λ , φ узловых точек ЦЛМ, использование которого в БКУ позволит значительно улучшить точность наведения ЦЛВ на зондируемые участки земной поверхности на перспективных КА ДЗЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кирилин, А.Н.** Развитие российской космической системы ДЗЗ / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов // *Аэрокосмический курьер*. -, 2007. - №2 – С.57-61.
2. Космический комплекс «Ресурс-ДК1»: Справочные материалы, выпуск 3./Под ред. д.т.н. Ю. И. Носенко. – М.: Маджерик, 2006. – 68 с.
3. **Аншаков Г. П.** Интегрированная система управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли / **Г. П. Аншаков** [и др.] // Сборник трудов IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. - С. 77-84.
4. Управление угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования / **Г. П. Аншаков** [и др.] // «Полет». – 2006. - № 6. - С. 12-18.
5. Бортовое навигационное обеспечение космического аппарата дистанционного зондирования Земли «Ресурс-ДК» / **Г. П. Аншаков** [и др.] // Сборник трудов XIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006. - С.187-193.