

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 629.78

Аншаков Г.П., Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Мантуров А.И., Мостовой Я.А.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ "РЕСУРС-ДК1"

#### 1. Введение

Развитие космических средств зондирования Земли вызвано потребностью решения с их помощью множества производственно-экономических и научных задач, а также их высокой результативностью как средств контроля выполнения международных соглашений.

15 июня 2007 года исполнился первый год успешного функционирования на орбите космического аппарата (КА) нового класса "Ресурс-ДК1" [1, 16]. Его общий вид представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид КА "Ресурс-ДК"

КА "Ресурс-ДК1" разработан ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс" в кооперации с ведущими российскими организациями – соисполнителями отдельных бортовых и наземных систем. Он относится к классу низкоорбитальных средств детального и многоспектрального наблюдения объектов на поверхности Земли с оперативной доставкой целевой информации по радиоканалу.

Основные характеристики КА "Ресурс-ДК1", приведенные в табл. 1, соответствуют мировому уровню.

К числу наиболее значимых факторов, которые определяют особенности таких КА и сложность управления их функционированием в сравнении с другими типами КА, относятся:

- нестационарные случайные возмущающие воздействия от набегающего потока верхней атмосферы, вследствие полета КА с переменной геометрией и массой на относительно низких эллиптических орбитах (с высотами от 250 до 700 км);
- необходимость решения на борту КА задачи высокоточного наведения оси целевой аппаратуры (ЦА) на заданный объект (маршрут) наблюдения, произвольно

расположенный относительно трассы. Это, в свою очередь, требует бортовых высоко-точных систем автономной навигации и пространственного углового движения КА;

- необходимость многократного прецизионного и быстрого перенацеливания КА в одном сеансе наблюдения с одного наблюдаемого объекта (маршрута) на другой для достижения высокой производительности процесса зондирования;

- необходимость управления движением изображения в кадре ЦА посредством управления угловым движением КА по критерию минимизации "смаза" изображения для получения целевой информации высокого разрешения.

Отмеченные особенности находят отражение в структуре процессов управления КА, в составе и структуре бортовых и наземных средств управления, в характеристиках целевой аппаратуры и обеспечивающих бортовых систем КА

Таблица 1.

Основные характеристики	Показатели
Масса начальная $M_0$ , кг	$\leq 6500$
Полоса захвата (с $H=350$ км), км: в надире при отворотах по крену	4,7 - 28,3 до 40
Полоса обзора, км	448
Диапазоны, мкм панхроматический (ПХ) три узких спектральных (УС)	0,58 - 0,8 0,5-0,6; 0,6-0,7; 0,7-0,8
Разрешение ( $H=350$ км) на местности, м	ПХ: $\leq 1$ УС: 1,5-1,8
Производительность зондирования, объект/сутки: объектовое маршрутное ( $L_{CP}=400$ км)	до 180 до 40

В работе рассмотрены основные принципы, методы и средства управления полетом, сформировавшиеся при создании КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в ГНП РКЦ "ЦСКБ - Прогресс"

## 2. Структура процессов управления КА

Структура процессов управления КА связана в основном с принятыми методами наведения оси целевой аппаратуры на объект зондирования и его удержания в процессе экспонирования ("захвата") [3, 4, 6, 15].

Для КА "Ресурс-ДК1" принят метод "захвата" по программе – заданию от НКУ, включающих в себя географические координаты наблюдаемых объектов. Разработанный в ГНП РКЦ "ЦСКБ - Прогресс" и внедренный в практику в 70-80 гг., этот метод постоянно развивается

и совершенствуется.

Управление полетом КА осуществляется автоматизированной системой управ-

ления (АСУ), которая традиционно реализуется в виде двух комплексов: бортового (БКУ) и наземного комплексов управления (НКУ), связанных между собой командной радиолинией управления и радиолинией бортовой телеметрической системы. БКУ в соответствии с заданиями от НКУ на основе текущей навигационной информации формирует временную диаграмму работы бортовых систем.

Общая структура БКУ для современных КА ДЗЗ представлена на рис. 2 [5, 15] и здесь рассматривается в аспекте автономности функционирования.

Основой БКУ является организующая система (ОС), которая обеспечивает требуемую автономность решения штатных задач и управление в аномальных ситуациях. В структуре ОС пять функциональных элементов (подсистем), реализованных в виде совокупностей бортовых программ.

Верхний уровень – подсистема принятия решений и координации управления КА обеспечивает взаимосвязанное функционирование всех подсистем ОС, исходя из текущей обстановки на борту КА.

Нижний уровень – подсистема исполнения принятых решений, т.е. команд управления на бортовые системы.

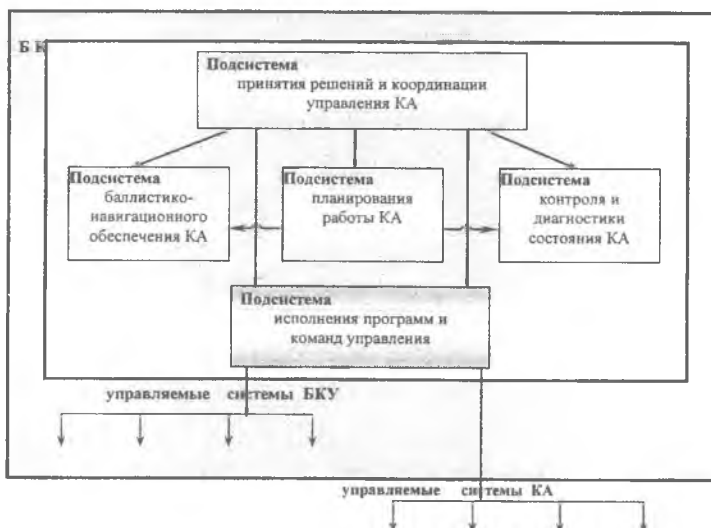


Рис. 2. Общая структура организующей системы в составе БКУ

Наличие трех автономных подсистем среднего уровня (бортовое планирование, контрольно-диагностическое и баллистико-навигационное обеспечение) обеспечивает требуемый уровень автономности полета КА (до нескольких суток) с сохранением высокой производительности проведения целевых работ. Функциональное наполнение

этих подсистем определяет степень интеллектуализации процессов управления.

В то же время наличие НКУ предполагает участие в управлении КА человека, как в ряде аномальных (нештатных) ситуаций, так и при штатной работе КА, когда НКУ осуществляет периодический контроль работы КА, расчет и задание рабочих программ.

В общем случае, распределение задач управления полетом современных КА ДЗЗ между НКУ и БКУ определяется требованиями по автономности функционирования КА и характеризуется степенью использования БЦВМ в качестве центрального управляющего элемента БКУ, решающего задачи целенаправленного взаимодействия всех бортовых систем по критериям эффективности КА в целом. Распределение функций управления между ними изменилось в пользу БКУ с 20% в 70-е годы до 90 % в современных КА ДЗЗ [15].

### 3. Особенности формирования программ управления угловым движением КА

В процессе исследований динамики управления полетом КА выявлены классы функционально подобных (но параметрически различающихся) угловых движений, совершаемых КА при выполнении целевых функций, которые соответствуют определенным этапам (участкам) его полета (зондирование маршрутов, проведение маневров КА, наведение панелей солнечных батарей на Солнце и т. д.).

Это позволяет построить для каждого такого класса движений типовые программы управления функционированием КА, что существенно упрощает проблему автономности их формирования бортовыми средствами. Для этого используется типовая совокупность параметров, настраиваемых в БКУ и определяющих положение осей КА в выбранном базисе: кинематические параметры (направляющие косинусы, кватернионы, углы Эйлера-Крылова и т.п.); векторы угловой скорости  $\vec{\omega}$ ; векторы углового ускорения  $\vec{\epsilon}(t)$ . На основе таких программ осуществляются различные виды зондирования районов земной поверхности: маршрутное, азимутальное, стереосъемка и другие [6, 15].

Задача обхода совокупности объектов зондирования в одном сеансе наблюдения решается посредством формирования в БКУ непрерывных программ управления угловым движением КА, которые позволяют обрабатывать заданный вектор "бега изображения" в кадре ЦА (для исключения смаза), а также требуемое движение между маршрутами, исходя из "мягких" (гладких) переходов между ними [6, 9, 12]. Организация таких программных движений КА базируется на высокоточной текущей навигационной информации. Для ее формирования оказываются пригодными только адекватные навигационные данные, получаемые непосредственно бортовыми средствами, что всегда

является серьезной проблемой.

С 1970-х годов в РКЦ исследовались различные виды навигационного обеспечения задач ДЗЗ [4, 9, 10]. Наиболее приемлемыми для КА ДЗЗ оказались два типа навигационных систем: астрорадиотехническая (в 70-х – 90-х годах) и спутниковая. В составе КА "Ресурс-ДК1" штатно эксплуатируется спутниковая система с использованием радионавигационного поля систем ГЛОНАСС и GPS. Она обеспечивает высокоточными навигационными данными как бортовых потребителей, так и наземную инфраструктуру с целью эксплуатации КА "Ресурс-ДК1" без привлечения наземных измерительных средств, а также позволяет значительно повысить уровень автономности его функционирования.

#### 4. Система управления движением КА ДЗЗ

Пространственная высокоточная ориентация КА ДЗЗ типа "Ресурс-ДК1" на всех участках его функционирования, включая маневры на орбите, угловые движения при наведении и отработке программ сканирования целей и т.п., обеспечивается высокодинамичной прецизионной системой управления движением (СУД) КА. В процессе ее разработки потребовалось решить ряд сложных научно-технических проблем [7, 12, 15]. Определяющими для КА "Ресурс-ДК1" оказались следующие три проблемы:

- Исследования динамики и автоматизации проектирования прецизионных гиросиловых СУД при внешних и параметрических возмущениях, при неполном измерении вектора состояния, с учетом упругих колебаний и подвижности элементов конструкции КА.
- Аналитический синтез в БКУ программ управления угловым движением, обеспечивающих заданный вектор "бега изображения" в фокальной плоскости ЦА на маршрутах, а также соответствующие (с гладкими переходами) межмаршрутные движения.
- Синтез структуры и алгоритмов прецизионного управления программным движением упруго-деформируемого КА с явной настройкой силового гироскопического комплекса для исключения его сингулярных состояний и "невозбуждения" упругих колебаний КА. Исследования проведены в классе робастных и адаптивных систем [12, 13, 14].

Решение отмеченных проблем обусловило создание соответствующих технических средств – измерительных и силовых структурных элементов СУД, представленных в табл. 2.

Следует отметить беспрецедентно малые уходы базы прибора БИС ЭГ, существенно влияющие на характеристики СУД.

Таблица 2.

Наименование прибора/системы	Направления развития	Основные показатели	Достигнутые значения	Достижим в ближайш. время
Бескарданная инерциальная система на базе электростатического гироскопа (БИС-ЭГ). Разработчик и изготовитель – ЦНИИ "Электроприбор", С.-Петербург	*снижение массы *повышение точности, *уменьшение времени готовности	*Уход базы, [с/сутки]; *Погрешности съема информации, [угл. с]: систематические, случайные *Масса, [кг]	5  20 20 28	2  5 5 14
Звездный координатор типа БОКЗ-М: неподвижный, широкоугольный с встроенным каталогом звезд. Разработчик и изготовитель – ИКИ РАН, Москва	*определение пространственной ориентации КА, *интеграция с ДУС, БСКВУ, *повышение: точности, допустимой угловой скорости, частоты съема информации	*Погрешности, [угл. секунда] при угловой скорости КА [град/с], *период обновления информации, [с] *Масса, [кг]	8  0,15  3 4	3-5  3-5  0,25 4-5
Измеритель угловой скорости волоконно-оптический (ИУС ВО). Разработчик и изготовитель – НПП "Антарес", Саратов	*уменьшение: погрешности масштабного коэффициента, нулевого сигнала, шума	*Погрешности: масштабного коэффициента [%], нулевого сигнала [град/с], шум, [град/с]. *Масса, [кг]	0,005  2,8·10 <sup>-5</sup> 7·10 <sup>-5</sup> 15	0,001  10 <sup>-5</sup> 3·10 <sup>-5</sup> 10
Силовой гироскопический комплекс на базе 4х гиросдинов с кинетическими моментами 100-250 Нмс. Разработчик и изготовитель – НИИ КП, С.-Петербург	*уменьшение массо-энергетических характеристик, *увеличение диапазона скорости вращения гиросузла, *уменьшение погрешности M <sub>упр</sub>	*Максимальная скорость гиросузла [град/с] *Погрешность отработки кинетического момента, [%] *Погрешность отработки заданной скорости гиросузла, [%]	8,6  3  3	~20  от 0.5 до  ~1

## 5. Контроль работоспособности КА ДЗЗ и управление в аномальных ситуациях

Контроль работоспособности, выявление аномальных ситуаций и диагностика причин их возникновения являются необходимыми элементами организации автономного управления КА.

На практике широко используются функциональный и тестовый виды контроля

работоспособности и технического диагностирования бортовых систем [2, 3, 15].

Методы бортового функционального контроля базируются на программных средствах.

Надежность их функционирования определяется в основном надежностью бортовой вычислительной системы (БВС) – системы с многоконтурным и многослойным резервированием [3]. Программы контроля работают в фоновом режиме, не мешая штатным алгоритмам. Основой для многих из них служат эталонные математические модели контуров управления, тщательно отработываемые в наземных условиях, в том числе, при имитационном моделировании функций систем.

При тестовом контроле проверка технического состояния систем КА выполняется, когда это не препятствует выполнению функциональных задач. При этом учитывается, что некоторые аварийные отказы могут инициировать отказы других систем и элементов, а также нарушения координации работы элементов. В этом случае эффективным инструментом является так называемый контур "аварийная защита". Основная функция этого контура – перевод систем БКУ и КА в некоторое допустимое состояние. Это - либо ориентированный дежурный полет (ОДП), в котором сохраняются ориентация КА, возможность проведения сеансов связи с НКУ и другие операции, либо неориентированный полет (НП), когда возможно лишь проведение сеансов связи с НКУ.

Бортовые модели реагирования на список предусмотренных аварийных ситуаций содержатся в бортовом программном обеспечении БКУ.

В целом, реализация функции принятия большинства управленческих решений автономно на борту КА как в штатных, так и в нештатных ситуациях, резко улучшает временные характеристики процессов восстановления работоспособности КА.

## **6. Проблема восстановления работоспособности КА**

Эта проблема декомпозируется на две частные:

- восстановление отказавшей материальной части систем – бортовой аппаратуры (БА);
- парирование ошибок бортового программного обеспечения (БПО) БКУ и его систем.

Восстановление функций отказавшей материальной части систем возможно различными методами [2, 3, 14]. Во-первых, это методы восстановления самой отказавшей БА (и ее элементов), которые базируются на известных принципах управления избыточностью. Причем они имеют особенности вследствие их недоступности для непосредственного обслуживания квалифицированным персоналом. Во-вторых, это методы восстановления функций, выполняемых той или иной БА в составе системы, исходя из принципа комплексирования бортовых средств и решения с их помощью подобной за-

дачи.

Обычный интерес представляет задача восстановления отказавшего бортового программного обеспечения (БПО) БКУ и его систем. Здесь есть определенная специфика, свойственная, в основном, автоматическим КА ДЗЗ [3, 5, 15].

Наиболее эффективным инструментом для этого является исполнение в оперативной памяти БВС специальной корректирующей программы – "программы из оперативной памяти" (ПрОЗУ). Она создается на Земле в оперативном порядке для конкретных аномальных ситуаций специалистами – разработчиками БПО и закладывается по командно-программной радиолинии НКУ в ОЗУ БВС. ПрОЗУ исполняется "параллельно" с неверно работающей штатной программой. В момент выдачи штатным БПО ошибочных результатов, они заменяются правильными данными из ПрОЗУ. Это оказывается возможным, благодаря специфической организации вычислительного процесса, реализуемого операционной системой БВС, допускающей параллельное исполнение компенсационной ПРОЗУ и штатного БПО с сохранением выполнения штатных задач КА.

Исследуются также методы прямой коррекции флеш-ПЗУ БВС по радиолинии.

Таким образом, рассмотренные методы позволяют корректировать работу БПО БКУ с сохранением штатных функций КА.

### **7. Особенности обеспечения надежности бортовых программ БКУ**

Ошибки в программном обеспечении носят скрытый характер и проявляются при определенных, достаточно редких наборах исходных данных или сочетаниях взаимодействий программ. Поэтому создание надежного БПО БКУ перерастает в проблему.

Применяются, как правило, три направления обеспечения надежности БПО: уменьшение первичного потока ошибок; проведение тщательной и достаточно полной отладки БПО; создание БПО, толерантного (устойчивого) к ошибкам.

Уменьшение первичного потока ошибок, вносимых в БПО БКУ при проектировании, обеспечивается использованием языков программирования, уменьшающих семантический разрыв между описаниями задачи и языком описания БПО, а также проведением алгоритмического моделирования перед началом разработки непосредственно программ БКУ.

Необходимо подчеркнуть важность структурного построения БПО для достижения его высокой надежности. Именно четкая структура делает ясной и понятной работу как большого программного комплекса, так и каждой отдельно взятой программы, что несомненно способствует сокращению первичных ошибок в БПО БКУ.

Кроме того, в структуре БПО БКУ всегда предусматривается формирование некоторого программного ядра, т.е. ограниченной части БПО, которая при проявлении



ошибки в комплексе БПО обеспечивает работу контура "аварийная защита", связь с НКУ, сбор и передачу контрольной информации, переход на алгоритмический резерв и т.п.

В этой связи на этапах разработки БПО безошибочному функционированию ядра уделяется максимальное внимание, и оно отлаживается во всех вариантах работы его программ – до нескольких сотен вариантов (ситуаций).

Известный в настоящее время путь создания БПО, толерантного к собственным ошибкам, связывается с использованием алгоритмического резервирования, что хотя и весьма затруднительно в реализации, но в некоторых особо важных случаях может быть оправдано.

Заметим, что именно проблема создания толерантного БПО – благодатное место приложения методов искусственного интеллекта.

Для отладки БПО созданы уникальные инструментальные наземные комплексы отладки (НКО) с соответствующим сервисным программным обеспечением. В состав НКО входят реальная БВС (эмулятор БВС) с загруженными штатными бортовыми программами. В состав НКО входят также цифровые модели бортовой аппаратуры, модели движения КА (центра масс и относительно центра масс), модели внешней среды и т.п. Данные инструментальные средства позволяют проводить отладку БПО в процессе имитационного моделирования полета КА, в том числе и с учетом перечня аномальных ситуаций.

Все это обеспечило высокую эффективность КА типа "Ресурс-ДК1" [1, 4, 16].

## **8. Заключение**

Рассмотренные методы и средства решения основных задач управления функционированием автоматических КА использованы при создании в ГИП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс" КА ДЗЗ "Ресурс-ДК1", который относится к классу высокоинформативных средств детального и многоспектрального наблюдения объектов на поверхности Земли с оперативной доставкой целевой информации по радиоканалу.

Большинство из рассмотренных проблем неизбежно возникает при разработке других сложных технических систем, использующих встроенную (бортовую) вычислительную технику, автономные системы навигации, прецизионного управления движением и адаптивные бортовые комплексы управления. Следовательно, полученные решения имеют достаточно универсальный характер.

## **Библиографический список**

1. Аншаков Г.П., Кирилин А.Н., Лапутин Ю.А. и др. Космический комплекс дистанционного зондирования Земли высокого линейного разрешения на местности "Ре-

- сурс-ДК". Труды 4-й международной конференции "Авиация и космонавтика-2005". М. – С. 94-95.
2. Аншаков Г.П., Соллогуб А.В., Данилов В.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: методические модели повышения эффективности КА. М.: Машиностроение, 1993.
  3. Козлов Д.И., Аншаков Г.П., Мостовой Я.А., Соллогуб А.В. Управление космическими аппаратами зондирования Земли: Компьютерные технологии. М.: Машиностроение, 1998.
  4. Низкоорбитальная платформа для оптикоэлектронного наблюдения с передачей информации по радиоканалу через спутник-ретранслятор "Гейзер". Научно-техническое, справочно-аналитическое издание "Космическая съемка Земли", 2003-2004 гг. – С. 34.
  5. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Антонов Ю.Г., Усталов Ю.М. Синтез организующей системы бортового комплекса управления перспективных КА наблюдения. Сборник научно-технических статей по РКТ. Самара, 2001.
  6. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Антонов Ю.Г., Усталов Ю.М. Управление угловым движением космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Сборник трудов X Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Самара, 2002.
  7. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Антонов Ю.Г., Усталов Ю.М., Пешехонов В.Г., Ландау Б.Е. Интегрированная система управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования Земли. Сборник трудов IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2002. – С.77-84.
  8. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н., Горелова О.И., Данилов С.Б. Моделирование программ управления угловым движением космического аппарата дистанционного зондирования при сканировании набегающего потока районов наблюдения. Сборник трудов XII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. Санкт-Петербург, 2005. – С. 58-64.
  9. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Усталов Ю.М., Горелов Ю.Н. Управление угловым движением КА дистанционного зондирования. "Полет", 2006, № 6. – С.12-18.
  10. Аншаков Г.П., Мантуров А.И., Мостовой Я.А., Рублев В.И., Усталов Ю.М. Бортовое навигационное обеспечение космического аппарата дистанционного зондирования Земли "Ресурс-ДК". Сборник трудов XIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. Санкт-Петербург, 2006. – С. 187-193.

11. Аншаков Г.П., Антонов Ю.Г., Макаров В.П. и др. Этапы и результаты создания систем управления движением КА наблюдения. Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике, Самара, 1999. – С. 88-98.
12. Аншаков. Г.П., Сомов Е.И., Бутырин С.А. Динамика прецизионных гиросиловых систем управления космическими аппаратами землеобзора. Сборник трудов X Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2004. – С.169-170.
13. Kozlov D.I., Anshakov G.P., Antonov Yu.G., Makarov V.P., Somov Ye.I. Precision Flight Control Systems of Russian Remote Sensing Spacecraft // Space Technology, 1999, vol. 19, no. 3-4, pp. 149-163.
14. Somov Ye.I., Butyrin S.A., Matrosov V.M., Anshakov G.P., Antonov Yu.G., Makarov V.P., Sorokin A.V., Bashkeyev N.I., Kondgat'ev O.A. Ultra-Precision Attitude Control of a Large Low-Orbital Space Telescope // Control Engineering Practice, 1999, vol. 7, no. 7, pp. 1127-1142.
15. Г.П. Аншаков, В.П. Макаров, А.И. Мантуров, Я.А. Мостовой. Методы и средства управления в высокоинформативном наблюдении Земли из космоса. Сборник трудов XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. Санкт-Петербург, 2007. – С. 165-173.
16. Дистанционное зондирование Земли. Космический комплекс "Ресурс-ДК1". Справочные материалы. Выпуск 3. Под редакцией Ю.И.Носенко. Москва, изд-во "МАДЖЕРИК", 2006.