



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Е. А. Микрин, Н. А. Суханов, В. Н. Платонов, И. В. Орловский, О. С. Котов, С. Г. Самсонов, В. Г. Беркут, Принципы построения бортовых комплексов управления автоматических космических аппаратов, *Пробл. управл.*, 2004, выпуск 3, 62–66

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

11 февраля 2025 г., 06:41:55



ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Е. А. Микрин, Н. А. Суханов, В. Н. Платонов, И. В. Орловский, О. С. Котов,
С. Г. Самсонов, В. Г. Беркут

Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева, г. Королев

Изложен подход к построению бортовых комплексов управления (БКУ) автоматических космических аппаратов. Описаны основные компоненты БКУ и решаемые ими задачи. Приведена структура программного обеспечения — главного интеграционного звена БКУ. Рассмотрены характеристики БКУ космических аппаратов “Ямал”, эксплуатируемых на геостационарной орбите в сфере телекоммуникаций.

Для обеспечения “жизнеспособности” разнообразных уже эксплуатируемых и только еще проектируемых космических аппаратов (КА) и выполнения ими целевых программ необходимо решить широкий круг задач, присущих всем типам КА. В числе этих задач следующие:

- обеспечение обмена информацией с наземным комплексом управления (НКУ);
- обеспечение снабжения аппарата электроэнергией;
- распределение электропитания на КА между потребителями;
- поддержание требуемого теплового режима на КА;
- определение и поддержание ориентации КА в пространстве;
- обеспечение движения КА в пространстве (перемещение его центра масс);
- обеспечение углового движения КА в пространстве (вокруг центра масс);
- определение (прогнозирование) местоположения КА на орбите;
- управление вращающимися солнечными батареями (при их наличии);
- сбор, хранение, обработка и передача телеметрической информации;
- управление работой систем и оборудования КА в соответствии с программой полета КА и с учетом его реального состояния.

При проектировании первых КА каждая задача решалась автономной работой отдельной системы, содержащей свою датчиковую аппаратуру, испол-

нительные органы, автоматику управления. С усложнением КА и увеличением числа решаемых ими задач появилась потребность в централизации управления и контроля за работой бортовых систем КА, прежде всего, в части рационального расходования и пополнения энергоресурсов, приоритетности и времени выполнения полетных и регламентных операций, автономного парирования нештатных ситуаций на основе результатов диагностики и тестирования бортовой аппаратуры и др. Разработка и внедрение на КА вычислительных средств с развитым программным обеспечением (ПО) позволили, в принципе, удовлетворить эту потребность. По аналогии с НКУ появилось понятие бортового комплекса управления (БКУ), объединяющего в себе основные бортовые системы КА и включающего в себя бортовую вычислительную систему, систему управления движением и навигацией, систему управления бортовой аппаратурой, бортовую аппаратуру служебного канала управления, систему бортовых измерений, а также программное обеспечение БКУ.

Для более детального рассмотрения принципов построения БКУ автоматических КА с целевой направленностью (связные спутники, КА наблюдения участков звездного пространства, космические аппараты зондирования Земли) перечислим их основные системы (рис. 1):

- бортовая вычислительная система в виде совокупности вычислительных средств и устройств сопряжения (адаптеров связи), обеспечивающая информационное взаимодействие с бортовыми



абонентами и предоставляющая свои вычислительные ресурсы для решения задач управления системами КА и задач контроля их работы;

- система управления движением и навигации или, в другой интерпретации, система ориентации и управления движением, предназначенная для управления движением КА как материальной точки (перемещением центра масс), так и для управления угловым движением КА (движением вокруг центра масс);
- система управления бортовой аппаратурой, выполняющая функции коммутации электропитания, усиления и преобразования электрических сигналов, а также выдачи команд управления в системы и приборы КА в соответствии с временными или логическими условиями;
- система бортовых измерений, предназначенная для сбора, обработки и передачи в НКУ телеметрической информации о результатах измерений, характеризующих состояние систем КА и протекающие на КА процессы;
- бортовая аппаратура служебного канала управления или командной радиолинии, представляющая собой радиотехнический комплекс для обеспечения своевременного обмена служебной информацией между НКУ и БКУ;
- объединенная двигательная установка, состоящая из комплекта двигателей для обеспечения перемещения КА относительно орбиты и углового движения КА;
- система обеспечения определенного теплового режима внутри КА;
- система энергоснабжения (СЭС) для преобразования первичной (солнечной) энергии в электрическую.

Задачи управления вращающимися солнечными батареями в некоторых типах КА решаются специальной системой ориентации солнечных батарей. В других КА эти задачи решаются в СУДН.

В некоторых классах КА в качестве отдельной структурной единицы рассматривается бортовая кабельная сеть.

Внедрение на КА вычислительных средств и новых конструктивно-технологических решений, применение современной элементной базы и средств комплексирования ПО позволили создать основу для построения интегрированных БКУ. Возможность оперативного контроля состояния систем КА и “умного” выполнения программы полета КА с учетом внешней обстановки, текущего статуса бортовых систем и имеющихся на текущий момент времени ресурсов позволила перенести многообразные функции контроля и управления КА в БВС, точнее — в ее ПО. Тенденция концентрации этих функций в бортовой вычислительной системе (ПО БКУ) продолжает усиливаться по мере развития программных и аппаратных средств. Программное обеспечение сформировалось как

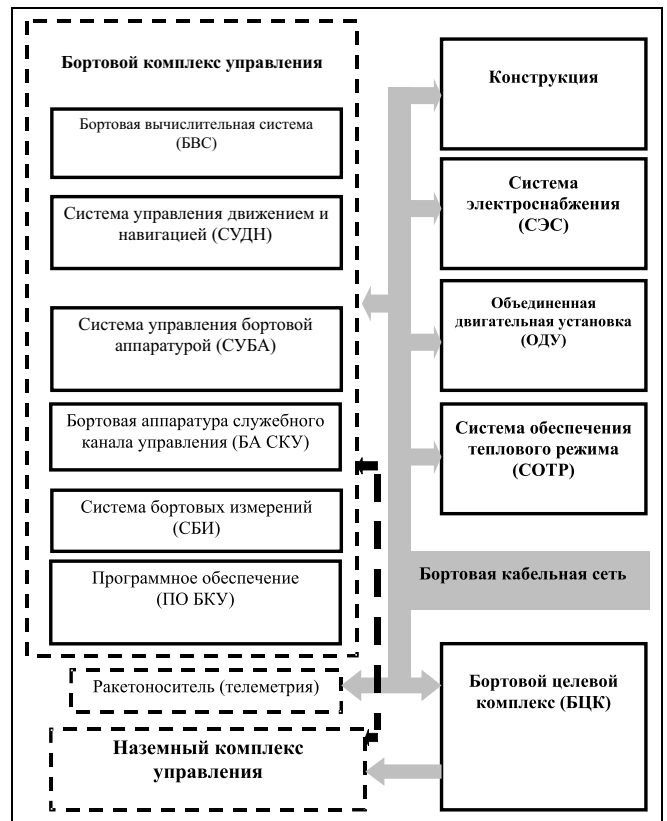


Рис. 1. Бортовые системы космического аппарата

отдельный (и одним из самых главных) компонентов БКУ (рис. 2).

Программное обеспечение БКУ построено по иерархическому принципу:

- первый или нижний уровень составляют драйверы обмена с аппаратурой и программы организации вычислительного процесса;
- второй уровень составляют программы обеспечения управления и контроля работы бортовых приборов и оборудования;
- программы третьего уровня включают в себя программы обеспечения полетных режимов бортовых систем и расчетные программы;
- четвертый или верхний уровень составляют программы планирования и организации режимов работы всего БКУ и контроль состояния систем КА.

Архитектура ПО БКУ подразделяет все программы на служебные (диспетчер, обмен, управление конфигурацией БВС, таймирование и др.) и функциональные (программы включения/выключения конкретных приборов, программы расчета различной подготовительной и сопроводительной информации, программы формирования управляющих воздействий на отдельные приборы и т. п.). Каждая программа (программный модуль) имеет свои настроечные параметры и логико-информа-

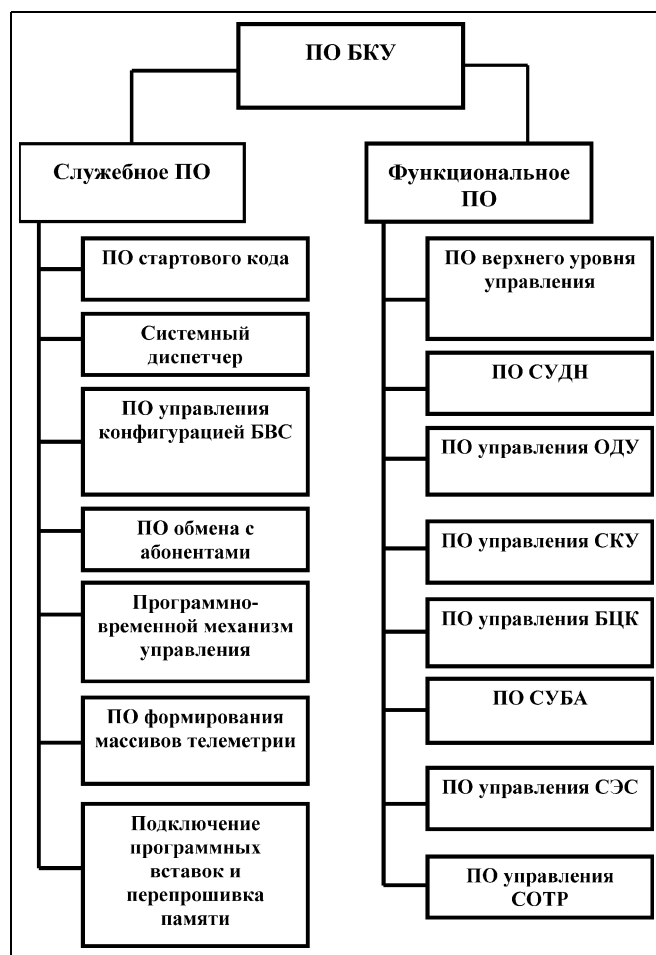


Рис. 2. Структура программного обеспечения

ционные связи с другими программами. Построение ПО БКУ предполагает детерминированное циркулирование обменной информации между программами всех уровней, причем управляющая информация поступает сверху вниз (от программ верхних уровней до программ нижних уровней), а контрольно-диагностическая информация — снизу вверх. Для обеспечения функционирования ПО БКУ в реальном масштабе времени каждой программе определяются последовательность и конкретное время подключения на вычислительном такте бортового компьютера, а также ее вычислительные ресурсы.

Интеграционный характер ПО БКУ позволяет выполнять, кроме функций контроля и управления, и другие важные функции и задачи, как, например:

- задачи повиткового планирования полета КА;
- задачи оптимизации расхода бортовых ресурсов;
- функции обеспечения автономности существования КА;
- функции оперативного реагирования на многие нештатные ситуации.

Получение цифровой информации от бортовых систем (напрямую или через СБИ), обмен информацией с НКУ (через БА СКУ), обработка и использование полученной информации в расчетно-вычислительных задачах, реализованных в ПО, — все это выдвинуло БВС и ПО БКУ на главенствующее место в бортовом комплексе управления. Системы БА СКУ и СБИ в такой конфигурации являются неотъемлемой частью БКУ как источники циркулирующей на КА информации и необходимые звенья, поддерживающие информационно-логические интерфейсы. Заметим, что связи между БВС, БА СКУ и СБИ как физические (проводные, через бортовую кабельную сеть и устройства сопряжения), так и “виртуальные” (информационные, через каналы информационного обмена).

Неотъемлемой и основной частью БКУ следует считать и систему управления бортовой аппаратурой. Две важные функции СУБА несут интеграционный характер и являются прерогативой БКУ:

- обеспечение всех бортовых потребителей электроэнергией;
- обеспечение физического (проводного) интерфейса с системами и оборудованием КА и управление ими путем формирования соответствующих команд и сигналов.

Все остальные из вышеперечисленных систем решают свои конкретные задачи, жизненно важные для КА, но не являющиеся интеграционными с точки зрения структурного построения БКУ. Из этих систем особо выделим СУДН, часто включаемую разработчиками КА в состав БКУ благодаря следующим аспектам:

- данная система (как и СУБА) — одна из первых бортовых систем, она проектировалась и разрабатывалась уже для первых КА;
- задачи СУДН (ориентация, стабилизация, наведение КА для решения целевых задач и т. д.) — важнейшие и первоочередные;
- программы управления СУДН тесно “привязаны” к программам управления других систем и программам “верхнего” уровня ПО БКУ и др.

В состав СУДН включены чувствительные элементы в виде оптико-спектральных датчиков и датчиков угловых скоростей, преобразующие устройства и блоки формирования управляющих сигналов, а также исполнительные органы в виде силовых гироскопов (например, маховиков или гироскопов). Исполнительными органами СУДН служат также двигатели двигательной установки. Состав аппаратуры СУДН может дополняться навигационными приборами и аппаратурой спутниковой навигации.

Основой построения СУДН разработки РКК “Энергия” является корректируемая бесплатформенная инерциальная навигационная система, позволяющая в реальном масштабе времени определять текущее положение связанных осей КА отно-



сительно инерциальной системы координат путем интегрирования составляющих абсолютной угловой скорости (рис. 3).

Функционирование СУДН обеспечивается работой трех контуров управления:

- кинематический контур управления ориентацией позволяет определять угловое рассогласование приборного базиса СУДН с неким опорным базисом, задаваемым режимом ориентации; кроме того, кинематический контур уточняет (корректирует) данный опорный базис;
- динамический контур управления ориентацией позволяет совмещать с заданной точностью связанный базис КА с опорным базисом; кроме того, динамический контур обеспечивает стабилизацию КА в процессе коррекции орбиты и других динамических операций;
- навигационный контур позволяет определять (прогнозировать) в реальном масштабе времени с заданной точностью местоположение КА на орбите по начальным условиям, определяемым в НКУ или в бортовой навигационной аппаратуре, с использованием расчетных гравитационных и магнитных моделей Земли и информации от бортовых навигационных датчиков КА.

К служебным системам автоматических КА рассматриваемого класса предъявляются сходные по своему составу требования, обусловленные полезной нагрузкой (или БЦК) к служебным системам этих аппаратов. В головных предприятиях космической отрасли наметилась тенденция разработки универсальных космических платформ (УКП), единых для различных типов автоматических КА. Интеграция готовой УКП с новым БЦК путем преемственности систем и приборов УКП и минимизации этапов проектирования и наземной отработки позволяет существенно сократить сроки создания новых КА и финансовые затраты при сохранении показателей качества и надежности.

Степень преемственности существующей космической платформы к применению на КА с новой целевой аппаратурой определяется, исходя из характеристик этой аппаратуры и состава требований к УКП, ее обусловленных. Основные характеристики БЦК: энергопотребление, масса, количество фидеров питания, тип интерфейсов и др. В число задач, определяемых условиями работы БЦК, включаются:

- обеспечение точности ориентации и стабилизации КА при работе БЦК;
- обеспечение точности наведения и ее оценка;
- обеспечение заданных параметров рабочей орбиты и длительности эксплуатации КА;
- выполнение заданных режимов работы БЦК и др.

Следствием анализа требований и характеристик БЦК является подтверждение пригодности УКП к интеграции с данным БЦК в составе про-

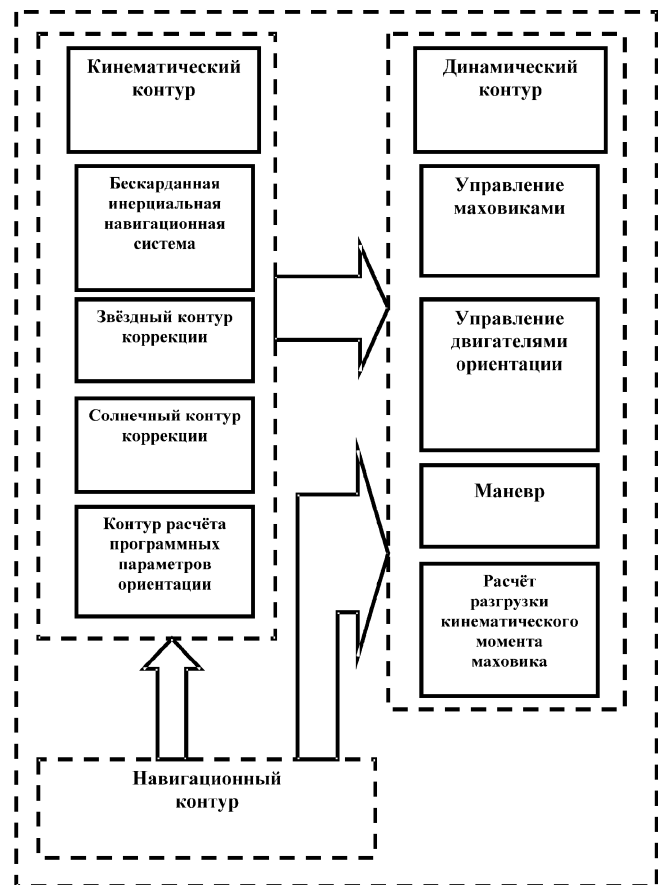


Рис. 3. Структура СУДН на базе двухконтурной бесплатформенной инерциальной системы

ектируемого КА либо определение перечня необходимых доработок и дооснащений УКП. Выбор окончательной модификации УКП применительно к новому БЦК определяется как решение многопараметрического функционала:

$$\Phi (M_i, N_{ij}, U_i, T_i, S_i, \dots, K_{ij}, P_{ij}) = 0,$$

где M_i — массы отдельных приборов и систем; N_{ij} — число однотипных приборов j -го класса в i -й системе; U_i — энергопотребление отдельных приборов и систем; K_{ij} — число интерфейсов (командных сигналов) j -го типа в i -й системе; P_{ij} — вероятность безотказной работы прибора j -го типа в i -й системе; T_i — длительность изготовления и испытаний отдельных компонентов; S_i — стоимость затрат на создание отдельных компонентов.

В такой схеме БКУ рассматривается как ядро УКП. Другими словами, БКУ является совокупностью основных служебных систем и бортового ПО, обеспечивающей интеграцию систем УКП при реализации функциональных задач КА на программно-логическом и физическом уровнях через

соответствующие интерфейсы. Основные задачи БКУ:

- координированное управление функционированием УКП и КА в целом при наземной обработке КА и штатном выполнении программы полета в автоматическом режиме и по информации от НКУ;
- диагностика состояния УКП и ее систем, обнаружение, локализация и парирование расчетных нештатных ситуаций в автоматическом режиме;
- сбор, первичная обработка, хранение и телеметрирование информации оперативного контроля, а также ее использование в задачах управления УКП;
- организация информационно-командного взаимодействия с БЦК.

Решение бортовым комплексом управления перечисленных задач сопровождается подтверждением качественных характеристик, таких как:

- высокий уровень комплексирования, т. е. организация комбинированной работы систем УКП и поддержка интерфейсов при реализации всех полетных режимов и операций в реальном масштабе времени;
- строгая иерархичность многоуровневой структуры построения БКУ и детерминированность движения потоков информации (командно-управляющей информации сверху вниз от “ядра” БКУ к каждому элементу и контрольно-диагностической информации снизу вверх от периферийных элементов до “ядра”);
- развитая “гибкость” управления, реализованная в алгоритмах управления ПО БКУ и обеспечивающая на базе целеуказаний от НКУ и обработанной диагностической информации от датчиковой аппаратуры эффективный расход ресурсов и задействование резервов, а также адаптивность к отказам и парирование нештатных ситуаций.

В РКК “Энергия” универсальная космическая платформа для связных и исследовательских КА была разработана в рамках тематики спутниковой системы “Ямал”. Основная целевая функция КА “Ямал” заключается в предоставлении пользователям спутниковой системы связи “Ямал” услуг в части телекоммуникаций. Запуск в сентябре 1999 г. КА “Ямал-100” и в ноябре 2003 г. двух аппаратов “Ямал-200”, а также последующая эксплуатация этих КА подтвердили идеологическую правильность выбранного направления в построении бортовых комплексов управления.

Бортовой комплекс управления универсальной платформы “Ямал” имеет следующие характеристики:

- троированное резервирование аппаратуры БВС; емкость памяти одной ЦВМ 1024 Кбайт, тактовая частота центральных процессоров 12 МГц;

- распределяемая мощность до 10 кВт, более 150 фидеров питания, около 600 команд управления;
- скорость приема информации из НКУ — 1 Кбит/с, скорость передачи информации на НКУ (при ориентированном полете КА) — 4,8 Кбит/с;
- измеряемых параметров — более 1000 дискретных, температурных и аналоговых;
- вероятность безотказной работы на орбите в течение 10 лет — не менее 0,945.

Реализованный вариант БКУ для УКП “Ямал” позволяет обеспечить требования к КА данной системы, основные из которых заключаются в:

- высокой надежности и длительности непрерывной эксплуатации на геостационарной орбите (ГСО);
- максимальной автономности функционирования КА;
- точности удержания КА в рабочей точке на ГСО 0,1°;
- точности наведения и удержания осей связной аппаратуры 0,2°;
- погрешности определения навигационных параметров по координатам не более 10 км.

Отработанная и готовая к применению в составе целого класса космических аппаратов платформа создает особенную привлекательность для заказчиков перспективных космических изделий. Развитие и совершенствование БКУ предполагается в следующих направлениях:

- доработка (замена на новые разработки) отдельных приборов и исполнительных органов БКУ, позволяющих улучшить точностные, динамические, массово-инерционные характеристики из условия требований со стороны целевой аппаратуры;
- повышение надежности и увеличение гарантированного срока функционирования отдельных приборов (путем применения современных электрорадиоизделий) и БКУ в целом (благодаря внедрению функционального резервирования на аппаратном и программном уровнях);
- при сохранении целевых функций и показателей БКУ снижение его общей массы и экономия интерфейсных ресурсов в интересах полезной нагрузки благодаря унификации разнотипных интерфейсов, применению более легких электрорадиоизделий, оптимизации размещения бортовой кабельной сети, переходу в отдельных позициях структуры БКУ на дублирование вместо троирования аппаратных средств.

Каждое направление предполагает выполнение комплекса работ и мероприятий и требует отдельного рассмотрения.

☎ (095) 513-63-46

E-mail: Eugeny.Mikrin@rsce.ru

